中国现代科学全书总编辑委员会

名誉主编 胡 绳 钱伟长 吴阶平 周光召
许嘉璐 罗豪才 季羡林 王大珩
郑必坚

主 编 姜士林 郭德宏 刘 政 程湘清
卞晋平 王洛林 许智宏 白春礼
卢良恕 徐 诚 王洪峻 明立志

（副主编和编辑委员名单容后公布）

农学编辑委员会

名誉主编 卢良恕 吕飞杰

主 编 信乃诠

编辑委员 （以姓氏笔画为序）
方智远 邓景耀 刘更另 刘焕亮
庄巧生 李德葆 朱显谟 沈荣显
吴常信 余松烈

目　录

第一章　概论 …………………………………………… (1)
第一节　农业气象学的定义、任务与内容………………… (1)
第二节　农业气象学的发展沿革 ……………………… (3)
第三节　农业气象学的重要进展与成果 ……………… (10)
第四节　农业气象学的基本经验 ……………………… (27)

第二章　农业气象基础 ………………………………… (32)
第一节　光与农业 ……………………………………… (32)
第二节　温度与农业生产 ……………………………… (49)
第三节　水分与农业生产 ……………………………… (64)
第四节　空气条件与农业生产 ………………………… (84)

第三章　农业气候 ……………………………………… (95)
第一节　中国农业气候的特点 ………………………… (95)
第二节　农业气候资源及其利用 ……………………… (98)
第三节　农业气候区划………………………………… (124)
第四节　农业气候的生产潜力………………………… (134)
第五节　气候变化与农业……………………………… (140)
第六节　世界农业气候研究…………………………… (153)

第四章　农业小气候…………………………………… (157)
第一节　农业小气候的基本原理……………………… (157)

第二节 农业小气候的类型及基本特征…………………（188）
第三节 农业小气候的调控和改善…………………………（221）

第五章 农业气象灾害……………………………………（225）
第一节 旱灾…………………………………………………（225）
第二节 涝灾…………………………………………………（238）
第三节 低温冷害……………………………………………（251）
第四节 霜冻与冻害…………………………………………（262）
第五节 干热风和热害………………………………………（283）
第六节 其他农业气象灾害…………………………………（299）

第六章 农业气象情报预报………………………………（317）
第一节 农业气象情报预报理论基础及常用方法………（317）
第二节 农业气象情报、预报的种类与内容 ……………（330）
第三节 农业气象情报、预报服务 ………………………（343）

第七章 农业气象观测及研究方法………………………（362）
第一节 农业气象仪器及观测方法…………………………（362）
第二节 农业气象统计分析法………………………………（364）
第三节 农业气象模拟………………………………………（381）
第四节 农业气象系统分析方法……………………………（396）

第八章 农业气象学发展趋势与展望……………………（413）
第一节 面向21世纪初叶农业气象学的任务 …………（413）
第二节 相关科技发展对农业气象学的推动作用………（424）
第三节 面向21世纪初叶的农业气象学展望 …………（431）

参考文献……………………………………………………（443）

第一章 概 论

第一节 农业气象学的定义、任务与内容

农业气象学是研究气象条件与农业生产相互作用及其规律的一门科学。农业生产决定于生物本身的特性,同时也决定于气象条件等环境因素。而气象条件又是影响农业生产的诸多因素中最活跃的因素。它不仅为生物提供基本的物质和能量,构成生物生长发育和产量形成的外部条件,而且光、热、水、气等气象条件的不同组合又强烈地影响着土壤、水的物理特性和状况,不同程度地影响着农业生产,因此,农业气象学的形成与发展是与农业生产密切相联的,也是由农业生产决定的。它是农业科学与气象科学相互渗透的边缘科学。农业气象学一方面研究农业生产对气象条件的要求和反应,研究气象条件对农业生产的影响;同时也研究农业对象对气象条件的影响,从而不断地揭示和解决农业生产中存在的气象问题,以谋求农业的高产、优质、高效益和农业的可持续发展。

农业气象学的主要内容 包括农业生物与气象的关系;农业气候资源开发、利用和保护;农业小气候的利用与调控;农业气象灾害发生规律及其防御;农业气象情报、预报服务和农业气象理论与方法研究等。

农业气候资源开发、利用和保护 农业气候资源研究的主要目的是为了充分、合理地开发、利用气候资源,同时还要科学地保护气候资源。众所周知,光、热、水、气是植物生长所必需的能量和物质,是重要的农业气候资源。农业气候资源的分布及其不均衡性,必然给各地带来明显的季节和年际变化特征,这就需要从实际

出发，客观分析一个地区的农业气候资源多年平均状况和长期变化规律，因地制宜地确定作物布局、种植制度和农林牧渔的生产类型与结构，为规划和指导生产提供依据。

农业小气候的利用与调控技术　农田小气候、林业小气候、水域小气候，以及各种人工影响措施（如地膜覆盖、风障、防风林等）的小气候效应研究，对于改善作物生长环境，预报不利气象条件，有着重要的作用。近年来，加强了农田能量平衡及光、温、湿、风分布规律的研究，为调节和改善作物生长的小气候状况提供了理论根据。

农业气象灾害发生规律及防御技术　研究农业气象灾害，包括干旱、洪涝、低温、霜冻、冰雹、台风等对农业的影响，历年受到各方面的重视。多年来，各地系统地研究了干旱、洪涝、低温冷害、干热风、霜冻等发生规律，包括危害时期、危害指标和危害机制，以及各项行之有效的防御技术与措施，对于防灾减灾、夺取农业丰收有重要作用。

农业气象情报、预报服务　开展农业气象情报、预报研究，是为农业生产服务的重要手段，其种类较多，主要有：农用天气预报、农业气象灾害预报、作物生长期预报、作物生长状况及产量预报等。将准确、及时的各种农业气象情报、预报正确运用于生产过程中，可以取得巨大的经济效益和社会效益。

农业气象理论与方法研究　这是农业气象学自身发展的需要，也是提高农业气象科学更好地为经济建设服务的重要途径。长期以来，农业气象工作者研究提出了作物产量形成的理论、气候资源生产潜力理论、农业气象系统中物质传输与能量转化理论等，并在研究方法上有新的发展，主要有调查考察法、田间试验法和人工环境模拟法、数值模拟法等，为发展农业气象学做出了贡献。

农业气象学是农业科学与气象科学的边缘学科，交叉、融合、综合性很强。同时，与研究对象相结合，又产生了若干分支学科，

主要有:作物气象、林业气象、牧业气象和渔业气象等。

作物气象 研究不同作物在全生育期和各生育阶段对光、热、水、气等要素的要求。如:作物生育期热量能否满足,高温、低温对作物生长发育的影响;作物生育期及需水临界期的水分供应能否满足,干旱、过湿对作物生长发育的影响;作物生育期光照条件能否满足,光照条件对作物生长发育和产量的影响。根据气象条件种植或引种相适应的作物,或通过改善局部地区小气候条件以适应作物生长发育的需求,来提高作物产量和品质,实现高产、稳产和高效。

林业气象 研究森林与天气、气象的相互关系。如:育林与气象条件的关系;森林砍伐对气候的影响;森林火灾与天气、气象条件的关系;森林对水分平衡和能量平衡的影响等。

畜牧气象 研究饲草生长和牲畜繁殖、营养代谢等与气象条件的关系。其中牧草生长、牧场载畜量和牲畜繁殖与气象条件的关系尤为密切。目前,畜禽集约化工厂化饲养与小气候的调节、控制,直接影响到畜禽生长和产量,备受关注。

渔业气象 研究气象条件对渔业资源分布和数量变化及渔业生产的影响。如:水温季节变化对渔场、渔量变动的影响;风对鱼类游动方向及水面营养物质分布的影响;灾害性天气预报服务于渔业等。

总之,专业气象还包括一些共性问题的研究并由此构成了农业气象学的完整体系。

第二节 农业气象学的发展沿革

恩格斯说:“科学的发生和发展从一开始就由生产所决定的。”许多古老农业国的广大劳动人民在长期的生产实践中,积累了农业生产与气象条件关系的知识与经验。中国春秋战国时期的典籍

就反映出中国传统的重农时思想。中国的《诗经》和《礼记》等典籍中载有农事和物候的知识;《吕氏春秋·审时》篇论述了农时与作物生育、产量和品质的关系;《淮南子》中有完整的二十四节气与农事活动的记载;《逸周书》记载了七十二候及相应的物候现象;《氾胜之书》总结了农业抗旱经验。后来许多大型农书中都有授时、占候专卷,其中有不少农业气象内容。如《齐民要术》详细讨论了防霜的方法;史书、地方志等也记载了各地的旱、涝实情。这些早期的农业气象知识与经验,为农业气象学的形成和发展奠定了基础。

到了 19 世纪后半叶,近代农业气象学开始萌芽,其基本特征是根据气象站网的观测资料,开展农用天气预报和情报服务,进行针对农业的气候研究。1854 年,L·布洛述在美国政府的农业报告中发表了 1 篇农业气象报告,研究了美国与世界其他地区农业气候的相似性,首次提出农业气候相似性。同年,俄国 D·鲁托维奇出版了世界上第一部《农业气象学》。1855～1875 年,欧美一些国家先后成立气象局,开展农用天气预报与情报服务。1880 年,在奥地利举行了国际农业和森林气象学会议。1881 年,德国的 R·阿斯曼在马格德堡成立了农业气象协会。1885 年,俄国建立了世界上第一批农业气象站(12 个)。1897 年,俄国建立了农业气象机构,组建了农业气象站网,制定了农业气象观测方法——平行观测法,研究不利气象条件对农作物生长发育的影响,在此基础上提出作物发育“临界期”的概念。

进入 20 世纪,由于农业生产的发展和基础科学的渗透,农业气象学有了新的发展和提高。其重要特征是从生物生态学观点研究作物的生物学特性,进行农业气候鉴定。同时,为合理利用地区农业气候资源进行农业气候区划;研究作物产量与气象条件关系,建立作物产量与天气模式;利用现代技术开展农业气象预报和情报服务。1920 年美国 S·W·斯密斯和 1923 年英国 F·C·霍顿等提出并应用了有效温度的概念。1929,1930 和 1937 年,俄国 Г·Т·

谢良尼诺夫提出了按气候特点对农作物进行分类的方法和按热量、水分与越冬条件做农业气候区划的方法。1939 年,意大利 G·阿齐根据小麦生长期中的水分和温度条件,划分了全国的小麦自然地理区:干热区、半湿温和区、潮湿寒温区、半湿寒冷区和干寒区。1931,1948 年,美国 C·W·桑斯维特以水分平衡为基础,用热量效率和降水有效性对气候分类。1948 年,英国 H·L·彭曼提出了由综合与辐射平衡和空气动力学方程得出的蒸发量公式。1950 年 3 月,世界气象组织(World Meteorological Organization,简称 WMO)成立,下设农业气象专业委员会。该专委会自 1953 年以来召开会议 11 次,组织各国农业气象工作者对共同关心的农业气象问题进行广泛调查与研究,编辑出版了一系列农业气象专题技术报告。1950 年,德菲纳提出了新的农业气候分类法。1955 年,美国 R·E·帕特勒森研究了土壤含水量对作物光合作用和呼吸作用速度的影响,认为作物对光、温反应有 2 种类型:一是单光周期、双光周期和全光周期;二是单温周期、双温周期和全温周期。1956 年,苏联 M·И·布德科所著的《地面热量平衡》一书出版,使气候学和农业气象学中的热量平衡研究进一步系统化。1959 年,苏联 E·C·乌兰诺娃在《农业气象预报方法》一书中详细介绍了各种预报方法。60 年代世界气象组织农业气象专业委员会组织开展了大量的专业气象活动,并相继出版了有关森林火险预报服务(1961)、防霜(1963)、天气和气候对水果(贮藏)质量的影响(1963)、防风林和护田林带(1964)、农业中的土壤水分问题(1969)、气象因子对小麦锈病流行病学的影响(1969)等方面的著作。这个时期,美国、日本等国先后建立了人工气候室和各种形式的温室,为在人工控制条件下研究生物与环境因子的关系创造了条件。1962 年,在堪培拉召开的"国际生物生长环境调控讨论会"上,科学家交流了在植物群落中物质和能量交换等方面的研究成果。1962 年 D·M·盖茨的《生物界的能量交换》、1963 年澳大利亚埃文斯的《植物生长

环境控制》等著作出版。1964年,荷兰埃塞维尔公司编辑出版的《农业气象学》和《生物气象学》等,对农业气象学的发展起到了积极作用。70年代后,由于全球性的气候异常给农业带来了严重影响,农业气象学受到各国政府的重视,发展迅速。1977年,苏联成立全苏农业气象研究所。1978年,美国农业部和国家海洋大气局联合成立农业气象办公室,负责编制每周天气和作物公报以及农业气象简报。日本成立了农业气象协议会,以改善气象和农业部门的农业气象服务。这个时期农业气象学的主要特点是:由定性或定量描述向数理模式发展,开展了土壤—作物—大气系统的研究和以能量平衡为基础的天气—土壤—产量模式研究。同时联合进行了大面积作物探测试验并获得成功,为开展气象服务提供了经验。1978,1979和1981年世界气象组织农业气象专业委员会举办了3期"卫星探测技术在农业气象中的应用"学习班。

同时,中国劳动人民在长期的生产实践中积累了丰富的农业气象知识和经验。20世纪初近代气象学理论和气象观测技术传入中国,并开始应用于农业。1911年辛亥革命以后,以气象观测资料为基础的现代气象学发展起来。1912年,中国政府开始建立气象台,同时一些农业试验场也开始设农业测候所,积累气象、物候资料为农业服务。1921年,竺可桢发表了《论我国应多设气象台》,呼吁发展气象事业为农业等国民经济服务;1922年,他发表了《气象与农业之关系》,积极倡导农业气象科学研究。1935年,陈遵妫的《农业气象学》一书出版。1945年,涂长望等在《农报》上发表了《农业气象之内容及其研究途径述要》,提出农业气象研究应着重于农业物候、气候适应性等内容,并对此作了比较全面系统的论述。

1949年中华人民共和国成立,农业气象学随着农业的复苏有了突破性发展,大致可以分为3个阶段:①"文化大革命"前的17年。此期是中国农业气象学创立与发展时期。这一时期,在组织

机构建立、队伍培养、条件建设、科学研究、成果推广、技术服务等方面，都取得了可喜的成就；②“文化大革命”的10年。此期使中国农业气象科技遭受严重摧残。这一时期，除了个别领域和项目取得了某些成就外，整个农业气象科技工作基本上处于停滞状态，而且在许多方面倒退了；③1978年改革开放以来，农业气象科技在恢复中整顿，在整顿中提高，又有了新的发展，开始了新的腾飞。

回顾50年来，农业气象学发展沿革，可分为：

(1)创建与发展时期 1949年新中国刚一成立，党和政府就十分重视农业气象科学。1953年，中国科学院和华北农业科学研究所共同倡导，经中国科学院和农业部商定，中国科学院地球物理研究所与华北农业科学研究所进行合作，于3月6日建立了中国第一个农业气象研究机构——中国科学院地球物理研究所、华北农业科学研究所农业气象组，这是我国最早的农业气象研究机构。1957年，中国农业科学院、中国科学院和中央气象局联合组建中国农业科学院农业气象研究室，并得到国务院科学规划委员会的批准。1954年底，东北、华东、西北、中南、华南、西南农业科学研究所、华南热带作物研究所和湖南、安徽省农业科学研究所相继成立农业气象研究机构。同时，中央气象局在台站处农业气象组的基础上，成立了农业气象科，1956年改为农业气象处，1958年成立农业气象研究室，先后在江苏丹阳、南京和首都北京举办了农业气象讲习班。1956年北京农业大学创办了农业气象专业，以后沈阳农学院、广西农学院、南京气象学院等相继设立农业气象系(专业)，有计划地培养农业气象人才。1958～1960年，北京农业大学举办了苏联专家农业气象讲习班，邀请苏联农业气象学家B·B·西湼里席柯夫来华讲学。1958年，中国农业科学院和中央气象局在南京召开了全国农业气象会议，在成都召开了“第一届全国森林防火和森林气象学术会议”；1963年，在沈阳召开了“第二届全国森林气象学术讨论会”。这些活动对推动全国农业气象科技工作起

到了积极作用。

与此同时，在1959年“反右倾”时，由于“左”的思想发展，中国农业科学院农业气象研究室人员精简80%，编制从50人减至10人，1960年由原子能研究所代管，部分省、自治区、直辖市农业科学院的农业气象研究机构和气象系统的农业气象机构有的精简下放，有的被撤销，科研与业务工作的正常秩序遭到破坏。1963～1965年，通过贯彻“调整、巩固、充实、提高”的方针，“左”的思想造成的影响得到了纠正，中国的农业气象科技又得到了恢复与发展。

(2)遭受严重破坏时期　1966年开始的持续了10年的“文化大革命”使我国的农业气象科学技术遭受严重破坏。林彪、“四人帮”把50年代末期科技战线曾经出现过的“左”的思想和政策发展到了极点，在“依靠七亿五，不依靠七千五”的错误思想指导下，掀起了“搬神拆庙”、“下楼出院”等拆散专业科研机构的妖风。1969年，中央气象局的农业气象工作被撤销，天气气候研究所的农业气象研究室被解散，人员下放“五七”干校。1970年，中国农业科学院农业气象研究室下放北京市，成为北京市农业科学院的一个研究室，人员减至34人。部分省、自治区、直辖市农业、气象部门的农业气象试验研究机构和业务服务机构，有的下放，有的撤销，造成了严重损失。农业气象高等教育事业也遭到严重破坏。但是，广大农业气象科技人员对林彪、“四人帮”的倒行逆施进行了不同形式的抵制和斗争，并在极端困难的条件下坚持了一些必要的科研和业务服务工作，为发展科学、服务生产做出了成绩。

(3)全面调整与发展时期　1978年党的十一届三中全会以来，纠正了“左”的错误，农业气象科技充满新的生机，又有了新的发展。1977年经党中央和国务院批准，下放北京的中国农业科学院农业气象研究室恢复了原建制，人员达51人。江苏、辽宁、吉林、黑龙江、陕西、山西、山东、浙江、上海、湖南、西藏等省、市、自治区的农业科学院先后恢复了农业气象研究机构。1978年12月中

国农业科学院在河北邯郸召开了全国农业气象科技发展规划会议,编制了《1978~1985年农业气象科技发展规划》。1979年,中国农业科学院农业气象研究室创办了《农业气象》季刊,1988年改名为《中国农业气象》。1981年,中国农学会农业气象研究会成立,挂靠在中国农业科学院农业气象研究室;1994年,该机构改名为中国农学会农业气象分会。1983年,中央气象局成立农业气象研究所。1990年,中国农业科学院农业气象研究室改为农业气象研究所,部分省、自治区、直辖市气象局恢复了农业气象试验站。北京农业大学、沈阳农学院、广西农学院和南京气象学院农业气象系(专业)恢复招生制度,培养了大批的专业人才,试验研究条件得到了改善,取得了一批重要科技成果。同时,随着社会主义市场经济的建立和农业两个根本性转化的需要,农业气象科技加快了改革开放的步伐,正在调整方向和任务,进一步拓宽研究领域,以迎接新的农业科技革命的到来。

这个时期,我国农业气象科技工作在恢复整顿中发展,在发展中深化改革,取得了新的进展。

——农业气象试验研究机构增加。据1995年统计,有国家级农业气象科研机构2个,有关部门和省科研机构中设独立研究室4个。气象部门加强了农业气象技术服务机构的建设,目前开设农业气象观测站达1 243个,其中国家农业气象基本站401个、农作物观测点818个、土壤湿度观测点901个、物候观测点647个、农业气象预报台站1 066个,在全国范围内建成了农业气象技术服务网络。

——农业气象科技队伍不断壮大。据1995年统计,全国有农业气象科技人员0.3万人,比1979年增长了2.6倍。其中国家级农业气象机构150多人、省级农业气象机构360多人、地县农业气象站技术人员1 930多人。1961年以来,培养出农业气象专业本科生3 200多人、专科生800多人和研究生200多人。出国进修、

合作研究和访问学者达160多人次。科技人员业务素质普遍提高，中青年科技骨干和跨世纪的学术带头人正在茁壮成长。

——农业气象试验研究条件得以改善。从1979年以来，国家和省级农业气象研究机构与业务管理部门试验研究和工作条件也有很大改善，有的引进了80年代先进仪器设备，建立了实验室和试验观测基地。国家农业气象基本站和农作物、土壤水分、物候观测点等，都配备了专门的仪器设备，如小气候综合遥测仪、土壤水分测定仪和光合有效辐射仪，采用了卫星遥感探测等新技术，通过观测、积累资料，努力为当前、当地农业生产服务。

——农业气象国际科技合作与交流增强。随着对外开放方针的实施，我国农业气象对外交流不断扩大，先后组织综合和专业团组，赴国外开展科技考察、合作研究和参加国际会议，同时，也邀请国外农业气象专家、学者来华考察、讲学和合作研究，推动了双边的科技合作与交流。1983年以来，还参加世界气象组织农业气象委员会第八届以来的各届会议。不仅引进了先进技术，培养了人才，而且还扩大了国际影响，使我国农业气象工作开始走向世界。

第三节　农业气象学的重要进展与成果

19世纪末20世纪初，农业气象学创建以来，由于农业长足发展和科学技术的渗透，在农业气候资源开发利用、作物气象、林牧渔业气象、保护地小气候、农业气象防灾减灾、农业气象预报服务等研究方面，取得了重要进展与突破，为农业生产发展做出了贡献。

（一）农业气候资源开发利用与农业生产布局研究

1929年和1930年，苏联Г·Т·谢良尼诺夫提出按气候特点对农作物进行分类的方法和按热量、水分与越冬条件做农业气候区划的方法，为在黑海沿岸地区发展茶叶等亚热带作物提供了科学

依据。1939年，意大利G·阿齐根据小麦生长期中的水分和温度条件，划分了小麦自然地理区：干热区、半湿温和区、潮湿寒温区、半湿寒冷区和干寒区。1918～1936年W·柯本提出的世界气候分类；1931年和1948年美国C·W·桑斯维特以水分平衡为基础，提出的用热量和降水有效性进行的气候分类；1948年英国H·L·彭曼由综合与辐射平衡和空气动力学方程得出的蒸发量公式等，为以后的农业气候研究奠定了理论基础。1948年前苏联Φ·Φ·达维塔亚对葡萄气候带的研究，为全苏葡萄的生产提供了依据。1951年，联合国教科文组织为了发展世界干旱地区的农业生产，曾组织这些地区的农业气候研究，1953年P·梅格斯为此提出一个以热量为主的农业气候分类方法。1954年Γ·T·谢良尼诺夫完成了全苏农业气候区划。进入60年代，联合国粮农组织、教科文组织和世界气象组织又一次组织对近东干旱和半干旱地区的联合调查，取得了可观的科技成果。

与此同时，随着50年代我国农业气象科学创建与发展。1955年吕炯发表了《农业气象学的目的任务及其发展途径》。1964年竺可桢发表了《论我国气候的几个特点及其与粮食作物生产的关系》一文，较系统地论述了按各地气候特点进行粮食作物合理布局的问题，引起了有关部门的重视。同年，中国气象学会召开了全国农业气候区划会议，推动了农业气候资源的分析和研究。1962年卢其尧等研究了农业气候资源问题，出版了《中国农业气候资源图集》。1984年崔读昌等研究出版了《中国主要农作物气候资源图集》。1979年以来，中央气象局组织了全国性的农业气候资源调查和农业气候区划工作，在多部门的协作下，先后提出了全国农作物气候资源图集、全国农业气候区划、全国主要农林作物气候区划、全国种植制度气候区划、牧区畜牧业气候区划等。同时，各省、自治区、直辖市气象部门组织进行了省、县级农业气候区划研究。这些区划比以往有了新的发展，注意了区划的综合性、系统性、针

对性和实用性，使区划系统配套，以适应农业发展的需要。值得指出的是，由李世奎等主持完成的中国农业气候区划，以近 30 年农业气候分析为依据，着眼于农林牧渔综合发展与布局，把区划系统分为 3 个等级，依次由 3 个农业气候大区、15 个农业气候带和 55 个农业气候区组成，为农业发展规划、农业结构调整与布局提供了重要的依据。

各省、自治区、直辖市普遍进行了综合农业气候区划，不少省还做了专项作物的农业气候区划。吉林省的区划将分级区划、聚类分析与综合叠加法相结合，既突出主要因子，又反映综合特征。第一级为热量分区，第二级为水分分区，第三级为农业气象灾害分区。第一级和第二级区划采用多因子逐级最优二分割法，第三级分区采用系统相似聚类方法和旱、涝、低温冷害的叠加图综合分析，将全省划分成 16 个农业气候区域。福建省气象局所做的区划，从水平发展到垂直分层，其具体步骤是：①选择有较广泛代表性的热量因子，确定农业气候指标界限值，运用综合评判的方法，先确定热量带界线的大体走向和位置，划分 3 个热量区；②用热量因子的分区推算模式，计算确定热量带界线的具体位置；③在各农业热量区，根据农业生产要求，选择指标划分副区；④应用稻田干燥度指标划分水平区和副区；⑤将热量区划和水分区划图叠加做出综合农业气候区划；⑥绘出该省有代表性山区的农业气候垂直分层图，以展示山区农业气候的主要差异。

以上区划成果，在农业生产实践中得到了广泛应用，为国家编制全国农业区划和制定农业发展战略提供了气候依据。80 年代中期完成的全国农业气候资源调查和农业气候区划的系列配套成果，已为国家计划委员会、农业部、国土资源部所采用。例如北方农牧过渡带的位置论证，及其沙漠化和防御对策的分析，旱作农业气候界线、北部林业气候界线的分析，已为“三北”防护林地区农业区划和“三北”防护林建设规划的调整提供了重要参考，并在近年

沙漠化防治工作中发挥了作用。同时,为农业布局调整和生产安排提供了气候依据。东北3省已按区划中热量带的划分,调整了品种布局,开始纠正了越区种植,减轻夏季低温的危害。黑龙江省根据气候优势分别确定了玉米、大豆、小麦作物的主栽区,其用线性规划法得出的这3种作物最优比例配置方案,已被该省领导批转各地参考。新疆的综合农业气候区划把自治区划分为7个经济区,提出吐鲁番和南疆西部扩大葡萄栽培,在南疆恢复发展蚕桑业,控制北疆棉区面积,扩大南疆棉区面积等,已纳入农业规划。湖南省根据暖区暖带调整不耐寒经济作物、林果的布局,收到了明显的效果。江西省区划中提出双季稻适宜种植高度、赣南发展甘蔗和柑橘、赣北发展大麦、鄱阳湖区发展蚕桑的建议被有关部门采纳,并显示出经济效益和社会效益。四川省根据区划中提出调整棉花布局的建议,减少了棉花面积,由原来的20多万 hm^2 调整为12万多 hm^2。广东、广西、云南、福建在区划中对充分合理利用南亚热带及热带资源的优势提出了许多建议,包括橡胶树发展的区划,为农业部门调整热带作物布局提供了依据。

(二)作物气象与粮食、经济作物生产的关系研究

人类对农业与气象条件相互关系的认识是逐步深化的。20世纪20年代初,竺可桢指出:五谷之所以能长茂者,全赖气候之适宜。1953年开始,先后对稻、麦、蔬菜和果树等作物生育的气象条件、橡胶树寒害进行了研究。60年代对北方干旱、干热风和低温冷害发生规律及防御措施进行了研究。70年代对种植制度、越冬冻害等进行了研究。80年代以来,重点对作物群体动态特征、生理、生化机制与空气动力学的气象规律,作物—土壤—大气系统模式进行了深入研究,取得了突破性进展。

粮食作物与气象条件的关系研究。水稻为我国首位粮食作物,播种总面积占粮食播种面积的29%,稻谷产量占粮食总产量的43%。水稻的生长发育和产量高低都与气象条件有密切关系。

丁颖等研究认为，水稻不同品种对日长和温度的反应是不同的，把我国水稻品种感光感温性划分为9级，并提出水稻的感光性和感温性是相互联系的，只有在适宜的日长范围内，温度的影响才能起作用。高亮之等研究提出了水稻安全播种期、安全齐穗期和安全成熟期的概念，用于指导水稻安全生产。陶炳炎等针对我国应用的杂交亲本感光性弱，感温性中强，亲本的发展速度在很大程度上受生育期间温度条件的制约，研究提出采用净效积温（或实效积温）预测花期，为解决杂交水稻制种花期不遇提供了依据。小麦是我国第二大粮食作物。金善宝等在小麦生态研究中，根据小麦对光照、温度的反应，对小麦品种进行分类。其中小麦品种对光照的反应划分迟钝型、中等型和敏感型3类。刘明孝等通过冬小麦的农业气象鉴定研究，把小麦品种通过春化阶段的条件划分为强冬型、冬型、弱冬型和春型4种类型，为小麦品种布局提供科学依据。小麦蛋白质含量是小麦品质的重要指标，蛋白质含量与气象条件有关。金善宝主编的《中国小麦学》指出，我国小麦蛋白质含量自北而南随降水量与相对湿度的递增有逐渐减少的趋势。北部麦区籽粒小、皮薄、硬质率高、蛋白质含量高、出粉率高；南方麦区籽粒稍大、皮厚、灰分较高、硬质率低、蛋白质含量低、出粉率低。刘厚培等指出，我国亚热带小麦灌浆期阴雨连绵、日照时数少、空气湿度大、土壤湿害和病害严重，不能提高蛋白质含量。同时，各地还重点研究了小麦分蘖、灌浆与气象条件的关系。从江苏镇江的试验资料得出了小麦单株平均茎蘖数与≥0℃的日平均积温的定量关系。从山东济南的试验资料得出，当日平均温度在16～22.5℃之间，随着温度的升高，灌浆速度加快；气温为22.5℃时，速度最大；当日平均气温在25～28℃时，速度迅速下降。玉米是我国第三大粮食作物。根据各地的资料分析表明，我国玉米的熟性类型主要用于3种布局：一是热量较少的冷凉地区，如东北的西北部；二是不同种植制度地区；三是山地立体农业生产的地区。山东省

农业科学院主编的《中国玉米栽培学》指出，我国的玉米产量与平均气温呈负相关，与气温日较差、降水量、日照时数呈正相关。玉米气候产量在气温较低、日较差较大、日照时数多的条件下，产量高；相反，则低。各地还研究了玉米生产与水分供应、玉米间套种与气象条件、玉米产量与气象条件的关系，都取得了可喜的成果，为玉米生产提供了气候依据。大豆起源于中国，品种资源十分丰富，如有早熟、中熟、晚熟，春、夏、秋、冬作大豆等各种熟性茬口类型的品种，适应地区广泛。在大豆与气象条件研究中，吉林省农业科学院认为，大豆在一般情况下缩短日照可以加速发育，长日照延长发育。叶修琪研究指出，12℃以下的日平均气温(当天最低气温7℃)对大豆发育接近于无效，12～20℃低效，20～25℃效率最高，26°以上逐渐减效，35℃以上的高温(日最高气温≥40℃)无效。孙玉亭研究了大豆产量与光、温、水的综合关系，建立了气候产量模式，得出积温$\sum T\geqslant 10$℃、干燥度K、T_{7-8}与实际产量有线性关系。

我国经济作物种类繁多，有纤维作物、油料作物和糖料作物等。各种经济作物的气候生态适应性各有不同，并与气象条件有密切关系。中国是产棉大国。棉花生产受到气象条件的影响。刘洪顺在分析中国棉花气候生态条件的基础上，把全国棉区分成3类，按各类的特点，提出了3组不同的气候指标，对我国棉花气候带进行分区。高士秀统计分析资料证明，长江流域棉区棉花产量与生育期日照、降水因子密切相关，特别是与6～9月总日照时数呈显著正相关，与总降水量呈极显著的负相关。韩慧君、郝云理等分析了黄淮海棉区影响棉花产量的关键气候因子，分为3种产量气候生态型，即初夏湿润、夏秋晴暖普遍丰收型；夏秋晴暖灌溉丰收型；夏涝或旱、秋季寡照(阴雨、低温)歉收型。韩慧君等还研究了黄淮棉区气象因素对棉花纤维品质的影响，提出了棉花纤维强度随日平均气温和最低气温升高而增强，成熟度、细度受热量和日

照时数影响,纤维长度受制于水分条件。油菜是我国主要油料作物。贺菊美、张承祥研究表明,秋播油菜的关键条件是越冬期的低温,并提出以最冷月平均最低气温-9℃为冬油菜栽培的北界,低于-9℃为春油菜区。刘典显等认为安徽淮北各地油菜播后到越冬前,≥0℃活动积温在1 100～1 260℃时,产量最高。油菜苗期以11月降水量与产量的关系最为密切,11月降水量愈少,产量愈低,反之则高,但降水量过多,产量也降低。甜菜是我国主要糖料作物之一,主要分布在温带地区。贺菊美、张守谆研究了甜菜块根糖分增长期所需求的关键性气候条件,提出了以7～8月的平均气温、6～9月的日照时数作为指标,将我国春播甜菜种植区,划分为适宜、次适宜和不适宜3个气候区。王学群研究提出齐齐哈尔的甜菜含糖率与生育期(5～10月)的降水量呈负相关,与同期日照时数呈正相关;9月的日照时数和日较差,也都分别与含糖率呈显著的正相关。柑橘原产于我国热带、亚热带地区,也是我国最主要的水果之一。根据中国农业科学院农业气象研究室等单位研究,柑橘对温度要求严格。日平均温度12.5℃以上开始生长,23～29℃最适宜,>35℃叶片光合作用明显降低,45℃时发生"日烧"现象,57℃会引起蛋白质凝固。柑橘对低温非常敏感,不同品种忍耐的最低温度是:松壳-20℃、宜昌橙-15℃、皱皮柑-12.4℃、金柑-10℃、甜橙-6.5℃、柠檬橙-4℃、伏令夏橙-3℃。沈兆敏等研究指出,柑橘果实品质与温度有密切关系,不同气候带中,由于热量条件不同,果品质量有很大差异。在北亚热带地区柑橘糖低酸高,风味不浓;在中、南亚热带地区,一般积温越高,品质越好,含果汁量、可食部分比例和糖分增加,而北热带的琼山,>10℃的积温高于8 000℃,品质并不理想。橡胶为四大工业原料之一,在国民经济和国防建设上有着重要的地位。我国农业气象工作者在橡胶树引种栽培,特别是在减轻、避免寒害的技术措施和地段环境选择上作了卓有成效的研究工作,1949年全国干胶产量不足200t,

到 1987 年达到 23.8 万 t, 提高了 1 200 倍。此外,对其他粮食作物、经济作物与气象条件的关系,也进行了不少研究,并取得了科技成果,为生产发展做出了成效。

(三)农业小气候调控与设施农业研究

设施农业是指人类为了克服不利的天气、气候等自然条件限制而采用人工的工程措施,为果蔬花卉、大田作物和畜禽水产等农业生物的生长发育、产量形成以及农产品储藏加工等创造适宜的小气候条件,以实现周年高效生产、供应和农产品储藏加工的农业。

20 世纪以来,随着工业化进程的加快,工业产品不断应用于农业,出现新的革命性变革。1938 年法国人莱达诺发明聚氯乙烯后,又经德国人研究,直到 1928 年才在美国开始进行工业化生产。1951 年日本开始试验应用塑料薄膜代替油纸和玻璃,并在蔬菜栽培中开始应用,发挥其增温、保墒、促进土壤微生物活动、抑制杂草生长的作用。以后美国、法国、意大利等国在园艺作物上应用,发展非常迅速,同时也提出了各种设施的小气候调控问题。

中国的农业气象工作者紧密结合生产发展需要,系统地开展了设施农业的小气候研究。首先是对风障小气候效应的研究。风障可以降低风速,提高贴地层气温,减少农田蒸发,延长作物生育期,促进早熟增产。据观测,风障背风面在障高 15～20 倍处都有减小风速的作用,在障高 5～6 倍处风速可减小 50%。风障对障前气温、地温均有一定的增温效果。15 cm 以上气温障内均高于障外,随着高度增加障内外气温差异减小,至 50 cm 以上已不明显,地面温度远高于障外。风障的小气候效应,为越冬宿根蔬菜创造了早发芽生长的条件,也为早春播种的小油菜、茼蒿、小萝卜、莴苣等耐寒蔬菜创造了提前播种或提早定植的时间。风障设备简单、成本低,是解决春淡季的途径之一。

其次,研究了地面覆盖小气候效应。50 年代初,美国在夏威

夷应用地膜进行果菜类覆盖栽培,增产效果明显。1964年意大利在西西里岛对菠萝、咖啡、草莓、烟草等经济作物进行了地膜覆盖栽培。1961年法国对瓜类作物进行塑料薄膜地面覆盖栽培试验示范,到1971年覆盖面积达2 500 hm^2。1978年中国从日本引进地膜覆盖栽培技术,经过消化、吸收和创新试验研究,取得了突破性进展。1979年以蔬菜作物为主,覆盖栽培面积44 hm^2;1980年试验示范面积扩大到1 667.5 hm^2;1982年进入大面积推广阶段,覆盖栽培面积达11.8万hm^2。1984年后,作物种类增加,面积扩大,已达133.4万hm^2。到目前为止在40多种作物上应用,面积已达880.4万hm^2,并且形成具有中国特色的地膜和秸秆覆盖栽培技术体系。据中国农业科学院农业气象研究所试验证明,用地膜和秸秆等物质覆盖农田后,可以改变地表的辐射平衡和热量平衡,使土壤上层和贴地气层形成特有的小气候环境,有利于作物生育发育和产量形成,实现高产稳产。据各地试验研究结果,地膜覆盖可使多种作物稳定早熟5～20天,增产30%～50%,增值40%～50%。

第三,温室小气候研究。19世纪后半叶,国外用“温室效应”理论来说明温室的升温。“二战”之后,欧美一些国家发展大型连栋玻璃温室并引入采暖通风调节设备。1950年以后,日本首先发展了各种塑料棚室,中国也对传统温室结构进行了改良,推广了透光保温节能的日光温室。近20年来,随着各种环境调节器材的使用,温室小气候的改善技术迅速发展。温室利用已由冷季扩展到周年,从温带扩展到极地和热带沙漠。

中国的农业气象工作者王修兰、罗中岭研究,覆盖材料的光学特性对温室的光质、光量有影响。聚氯乙烯和玻璃对短波辐射的透过率都在80%以上,对长波辐射几乎不能透过。具有特殊透射光谱的有色薄膜和玻璃,能改变室内辐射成分而影响作物的生长和品质;塑料薄膜能吸收紫外线,使紫外线透过率明显下降。塑料

薄膜吸附尘埃、水滴和老化后，透光率亦显著下降。覆盖材料对温室的保温效果有直接的影响。一般不加温的日光温室，白天室内气温可比室外高2倍以上；夜间室内最低气温比室外高1～4℃。玻璃+草苫保温效果更好，一般可减少散热提高室内温度5～7℃。温室CO_2浓度有明显的日变化，据测定，密闭温室内在日落后CO_2浓度逐渐升高，清晨时最高，约达500～1 000 mg/l；日出后因作物光合作用使CO_2浓度迅速下降，经1～2 h可降至100 mg/l以下，接近作物CO_2浓度补偿点。温室通风后，CO_2浓度可维持在300 mg/l水平上。温室通风对防止白天高温、夜间高湿、补充CO_2和氧气、排除有害气体等有着重要作用。随着日本、荷兰、美国、以色列等现代化温室的成套引进，温室小气候及其调控技术的研究进入了一个新的阶段。目前，在北京条件下现代化自控温室黄瓜每公顷产量达9万～18.8万kg，番茄达15万～22.5万kg，取得了较好的经济社会效益。

(四)畜牧、水产气象与养殖业生产研究

畜牧业、水产业是人类与自然界进行物质交换的重要经济门类。农作物通过光合作用合成的有机物质，一部分可转化为供人们直接利用的肉、蛋、奶等畜产、水产品。我国现有草地4亿hm^2，主要分布在北部、西部、青藏和南方广大地区。不同年份、不同季节，由于气候条件特别是水热状况的差异，草场产草量有很大的不同。据1988年畜牧气候区划科研协作组研究表明，北部牧区从内蒙古的东部呼伦贝尔草原到阿拉善荒漠，产草量大致与年平均降水量等值线的变化趋势一致，即每100 mm降水量、每667 m^2(1亩)产鲜草50 kg。草甸草场产草量为200～300 kg，干旱草原为50 kg，荒漠草场为50～100 kg，荒漠区只有几十千克。西部牧区，以新疆北部山区为例，因水热状况不同，每667 m^2产鲜草从50 kg递增到300～400 kg。西藏高寒牧区，由东南向西北，地热由低而高，气候由暖湿逐渐过渡到寒冷干旱，每667m^2产鲜草为＞250

kg、250～70 kg、<50 kg 和 20 kg。南方亚热带天然草地由于水热条件不同，每 667 m^2 产鲜草有 220～250 kg、500 kg 几种情况，有的在 1 000 kg 以上。同时，南方草地一年可刈割 3 次，再生草量可分别达 30%～50%，50%～80%，80%～200%以上。

同时，气象条件与牧草品质，特别是营养成分中的粗蛋白质、粗脂肪、无氮浸出物和粗纤维的含量有密切关系。据李毓堂等调查，我国北方牧区太阳辐射量大，温度日较差大，有利于干物质积累，一般牧草品质较好，营养成分高。而南方山地阴雨多，空气湿度大，日照时数少，牧草品质较差，出现“三低一高”，即粗蛋白、粗脂肪、无氮浸出物明显偏少，粗纤维含量偏高。

1986 年西北农学院编辑出版的《家畜生态学》，研究了家畜引种与气象条件的关系。作者认为，家畜引种工作成败与两地主要气候条件的异同有关，提出了畜牧气候相似性理论。例如新疆细毛羊育成于新疆巩乃斯种草场，引向内蒙古、东北、华北、西北等地，经多年饲养繁殖，表现适应性良好。罗姆尼半细毛羊原产于新西兰的罗姆尼地区，属温带海洋性气候，1966 年引入我国内蒙古自治区同和太种畜场和安徽大播种草场，前者由于两地气候条件截然不同而失败，而后者由于两地气候基本相似，其罗姆尼半细毛羊引种获得成功。又如荷兰牛原产于温暖湿润气候，引入我国华中、华北一带后，除注意夏季高温天气采取降温措施外，其他季节的温湿度条件与原产地基本相似，其遗传性表现稳定，适应性良好，并在培育我国黑白花奶牛中起到了重要作用。

一年四季牧事活动与气象条件也有密切关系。据东北农学院、西北农学院研究资料表明，牧区秋季公畜的精液质量好，母畜受胎率高，这是营养和气象条件共同作用的结果。农区家畜以舍饲和圈养为主，群体较小，家畜的季节性发情表现得不够明显，如猪、奶牛、山羊等均可全年发情配种。粗毛羊和山羊等在每年春末，当日平均气温 10～15℃ 时，其被毛有自行脱落的现象。一般

绵羊剪毛、山羊抓绒，北部和西部牧区多集中在5月下旬至6月上旬；气候较暖的平原农区可提早到5月上旬；青藏高原一般在6月下旬至7月上旬剪毛。剪毛过早，气温偏低，羊只受冷，热代谢不平衡，稍有天气变化易受冻致病或死亡；剪毛过迟，气温回升快，畜体散热困难，影响采食和健康。黑白花奶牛在气温10～20℃时，奶的产量与成分变化很小；20～27℃时产奶量下降，且乳脂率降低；超过27℃时，产奶量明显下降。

我国的水产养殖以淡水养殖为主。近年来咸淡水养殖和海水养殖发展很快。池塘养鱼的性成熟与水积温的关系非常密切。如生长在不同地区的鲢鱼，虽然性成熟年龄存在差异，但达到性成熟期所需的水积温（界限水温为15℃）基本一致，约为18 000～20 000℃。每种鱼开始产卵的水温是一定的。如鲢、草、青鱼开始产卵的水温为18℃，团头鲂为18～20℃，鲤鱼为14～18℃。鱼类当水温降至10℃时，已不摄食，需要在水层较深的池塘内越冬。毛忠际等研究，亲虾越冬一般在越冬池内进行，若水温过低会引起大量死亡，如中国对虾在水温低于6℃时就有死亡的危险，日本对虾在3℃时呈死亡状态，斑节对虾若长时间生活在低于14℃水中就会死亡。因此，越冬池水温一般应控制在8～10°C之间，对于长毛对虾、斑节对虾等暖水性虾类，应控制在15℃以上。对虾放养时，养成池水温不低于14°C，与虾苗原生活环境比较，温差不超过8℃；低盐差不超过10%，高盐差不超过5%。宋丽莉等研究，中国对虾生长的适宜水温为18～30℃，最适宜为25℃，高于35°C生长不利。山东沿海大面积养虾池旬平均水温为25.8℃，对虾旬生长量最大。对虾捕捞应根据其生长、水温、饵料供应和潮汐等因素综合考虑而定。中国对虾一般应在水温降至13℃以前捕捞完，长毛对虾应在水温降至15℃以前捕捞完。

水产品贮运、加工与气象条件有密切关系。据研究表明，四大家鱼运输的适宜水温为5～15℃；鲤科活鱼运输的适宜水温为

5～10℃；罗非鱼为18～20℃。温度过高，易消耗大量的氧，并放出较多的热量，会造成活鱼的死亡。干制品加工通常需要借助阳光(同时也靠风力作用)，使水产品中的水分蒸发。腌制品在加工过程中，如果温度过高，则会加剧腐败微生物对腌制品卤水中可溶性蛋白质的进一步分解，导致腌制的水产品逐渐酥软变臭。

(五)林业气象与林业生产研究

我国国土辽阔，地形复杂，气候多种多样，森林植被资源十分丰富。据研究，森林植被的光合强度随光照强度升高而增加，当光合作用放出的O_2与吸收的CO_2和呼吸作用中消耗的O_2与放出的CO_2数量相等时，这时为森林光合作用的最小需光量(光补偿点)。森林生长最有利的温度，不是持续恒温，在白天高温与夜间低温交错的条件下，其生长会更快。在森林生长过程中，各发育阶段都要求有一定的热量，如果热量不足，发育阶段就不能完成，下一个发育阶段也就不能开始。水分是森林生长的重要条件之一，一般把年降水量400 mm作为森林气候的分界线。年降水量不足400 mm，生长季节相对湿度在65%以下的地方，天然林就难以形成。根据对水分的需求不同可划分为旱生、湿生和中生3种树种。

每个树种在自然条件下，都有一定的气候适宜范围。国内外树种的引进，其先决条件是气候的相似性。主要气候因子是温度、降水和光照等。研究资料表明，林木种子在5～8℃即可发芽；在15℃时发芽明显加快；在25℃时发芽最旺。在人工育苗条件下，5月份塑料棚内比棚外温度高出4～10℃，早晨温差小，中午温差大，有利于苗木生长。同时研究了造林的气候条件，一般认为在平均气温回升到10～22℃时最适植树。但在北方干旱条件下，造林不仅要考虑温度，还要考虑降水和土壤水分条件。

地球上森林是陆地生态系统中最大的一个生态系统。森林的消长直接关系到生物圈的生态平衡，也关系到气候的变化。利用

森林气候的特点，兴利避害，是充分利用气候资源的一项重要措施。据多方面研究，森林是碳循环的主要环节，不仅是 CO_2 的主要消耗者，也是生物固碳的主要贮存者。森林具有调节气候，涵养水源，保持水土等功能。周重光等研究，在亚热带的天目山地区，能吸收和截留自然降水，其有效值平均为 39.6 t/hm²，而超过饱和持水量的水分渗入到土壤中，很少产生地表径流。在静态条件下，0～60 cm 总蓄水量平均值为 3 978 t/hm²，为该地降水量的 24.1%。汪汇海等在四川卧龙自然保护区测定，常绿针叶林最大持水量为 36.5 t/hm²，次生落叶阔叶林最大持水量为 42.2 t/hm²。森林的这种蓄水能力对减少径流起了重要作用。

森林还具有改善农田生境、防灾减灾的作用。近年来，我国加快了防护林建设步伐，先后完成了平原绿化、"三北"防护林、长江中上游防护林、沿海防护林体系建设，开始成为农业生产的绿色屏障。据宋兆民等测定，在建成了农林复合生态系统的农区，农田防护林可降低风速 30%～40%，各种动力参数(湍流交换系数、动量通量、湍流通量)在旷野区都有减小，同时空气阻力系数增加了 2 倍左右，这对提高林网的防护效益是有益的。防护林对水热状况有直接的影响。由于风速降低，空气相对湿度可增加 5%～10%(活动层上 0.5 m 处)，0～60 cm 土壤含水量一般比旷野提高 15% 左右。有防护林网的麦田可能蒸散量比无林网防护的麦田降低 9.8%左右。上述这些变化对农作物有明显的增产效果。宋兆民等研究，在干旱、半干旱地区，防护林可使农作物产量提高 10%～30%；在半湿润、湿润地区可增产 5%～20%；在气候异常的条件下，可以成倍地增产。

(六)农业气象灾害与减灾防灾研究

世界上旱灾、水灾和暴风等灾害频繁发生，其严重程度有增无减，给农业生产造成了严重损失。1997 年联合国粮农组织的紧急活动报告指出："全世界发生的重大灾难 60 年代为 16 项，70 年代

为29项,80年代为70项,而且呈上升趋势。""60年代全世界灾害造成的损失估计每年达10亿美元,到了70年代每年的损失增至30亿美元,80年代猛增至90亿美元,到本世纪末,这种损失可能进一步增加。"

20世纪以来,气象灾害频繁。日本1902,1905,1906年连续发生冷害,水稻生产大幅度减产。中国1941～1944年黄河以北持续4年发生特大干旱。"农作物颗粒无收,民不聊生,卖儿卖女,流离失所,村庄绝户。"1972～1974年非洲撒哈拉以南地区及前苏联、美国、澳大利亚等发生严重旱灾,出现了世界性的粮食危机。1988年受干旱的影响,美国中西部地区谷物减产30%,加拿大减产23%;中国受灾面积5 609.2万hm^2,绝产490.8万hm^2,比上年增加12多万hm^2,其中受旱面积3 268.3万hm^2,比上年增加近800万hm^2,粮食总产39 408万t,比上年减产2.2%,粮食人均占有量由1984年的394 kg下降到362 kg,直接影响到世界粮食安全。因此,各国都把农业气象灾害研究列为重点,并且经过多年的工作,取得了诸多科技成果。

中国是世界上农业气象灾害最严重的国家之一,据联合国气象组织(WMO)统计,中国干旱、洪涝灾害发生频率最高,其中旱灾面积占60%,洪涝灾害面积约占23%。1985年根据冯佩芝等研究,全国360个站的资料分析,干旱指标(降水量距平%)连续3个月的一般干旱占－25%～－50%,重旱占－50%以上;连续2个月的一般干旱占－50%～－80%,重旱占－80%以上;连续1个月的一般干旱占－80%以上。冯佩芝等还选用了全国358个站的降水量,按标准分析了全国雨涝灾害的范围、程度和季节,其结果为:①两广大部、福建南部受涝几率平均3年2次;②湖北、赣北、浙、苏、闽中、闽北沿海、淮河流域大部地区平均二三年1次,黄河下游地区,平均5年1或2次,海河流域平均3年1次;③江南南部、武夷山区、汉水流域、长江中游至淮河南岸之间及四川盆地部

分地区，平均三五年1次；辽河中下游四五年1次；④黄河中游、黑龙江省、吉林省平均6年1次；⑤云贵高原平均15年出现1或2次，西北大部、青藏高原、内蒙古高原及大、小兴安岭地区，30年中没有出现过较大范围的涝灾。1986年低温冷害科研协作组何维勋、潘铁夫等研究认为，中国冷害的发生地区很广，最严重的是东北地区。东北地区秋冷最频繁，春冷次之；华北地区冷夏较为突出；长江流域双季稻区冷害主要发生在9月中下旬；华南寒露风较严重，其次是5月寒；南亚热带及其以南地区冬季也会发生冷害。研究证明，冷害具有阶段性、周期性和群发性特点，同时冷害可分为障碍型冷害和边迟型冷害。1991年何维勋等研究认为，霜冻可分为早霜冻和晚霜冻2种，在不同天气形势下发生，可分为干流型、辐射型和混合型霜冻。不同类型霜冻对作物的危害性会有很大差异。一般而言，在一年一熟地区，初霜冻造成的灾害比较严重，晚霜冻的危害相对减轻；在一年两熟地区，晚霜冻危害较重，早霜冻害较轻；南岭以北的一年三熟地区，早、晚霜冻都相对较轻；南岭以南和闽南一年三熟地区，霜冻相对较重；云南及贵州南部，霜冻害比较频繁。1988年北方小麦干热风科研协作组对小麦干热风进行了系统研究，明确了发生时期与地区分布，并对危害指标及其机理进行了探讨。此外，还对越冬冻害、冰雹和风害等进行了研究，也取得了重要进展。

在掌握农业气象发生规律的基础上，对农业气象灾害防御对策进行了研究，提出了减灾防灾体系，主要包括灾害监测预报、抗灾指挥系统和救灾系统，并针对不同的农业气象灾害，提出具体的防灾减灾措施，收到显著的经济效益和社会效益。如我国的水利建设，采取蓄水与泄洪相结合的方针，在防旱排涝中发挥了重要作用。华北地区多春旱、常夏涝、秋又干，先旱后涝、涝后又旱、旱涝交错。若只蓄不泄，多雨年易发生洪涝灾害；只泄不蓄，少雨年、少雨季将遭旱灾。既修水库蓄水，又疏通河道提高防洪能力，则可大

大减轻旱涝灾害。又如在干旱、半干旱地区发展地膜覆盖和秸秆覆盖技术,具有良好的保墒、增温效益,增产效果明显。山西省已推广73.3万hm^2,陕西43.3万hm^2,甘肃66.7万hm^2以上,一般小麦增产40%~60%,玉米增产50%~80%,谷子增产35%~50%。再如1977年开始建设的"三北"防护林体系,经过10年努力,造林867万hm^2,受保护的农田达800万hm^2,灾害开始减轻。据调查,严重干旱年林网保护下的玉米比林网外的增产50%左右。在平原地区营造防护林,可以有效地减轻干热风的危害。1976年6月22~25日,山西晋东南发生干热风,林网保护下的麦田,气温低1.5℃,相对湿度高10%,风力减小60%,小麦增产在18%以上。此外,各地还可以采取趋利避害的农业措施和行之有效的防灾减灾技术,都可以防止或减轻农业气象灾害所造成的损失。

(七)农业气象情报、预报与服务研究

人类在长期的生产实践中,逐步积累了农业气象预报知识。我国早在20世纪30年代,就根据降水等条件,对各省的水稻、玉米、棉花等作物试作产量估计。新中国成立后,随着农业生产的发展,坚持气象服务的农业为重点的方针,在全国建立了400多个国家农业气象基本站、300多个省级农业气象基本站,分别承担了农作物、畜牧、林木、果树、蔬菜、水产养殖、自然物候和土壤温度等观测项目,负责拍发农业气象旬(月)电报,按作物或年度报道农业气象观测记录报表。同时,国家气象中心负责全国重大的农业灾害天气预报和农用天气预报。国家卫星气象中心进行了大范围的洪涝和森林、草原火灾等监测并为农业气象产量预报提供气象卫星资料。气象科学研究院农业气象研究中心负责农业气象情报和农作物产量预报的编制、服务。省、地、县多数气象局(台、站)设有农业气象服务机构,开展了农业气象适用技术推广和农业气象服务工作。

中国的农业气象情报服务，大致可分为以下几种类型：①实时服务，包括旬报、月报、季报、年报，其主要内容，多数是根据气象要素值与历年同期比较，来反映农业气象条件正常与异常状况，及其对各种作物生长发育的影响及程度。②专题服务，有明确的服务专题或具体的服务项目，为政府部门、农业生产单位和农户等进行有效的服务。③咨询服务，参与政府部门召开的农业生产形势分析会、会商会，利用气象部门的业务优势，为生产提供咨询性意见。

农业气象服务机构和试验研究单位，还结合农业发展需要，开展了专项的预报服务的研究工作。在农作物产量预报服务方面，研制了不同时空尺度的多种预报模型，包括分解合成统计模式、结构阶乘统计模式、生长动态数值模拟、遥感综合估产方法等，及时投入业务应用，取得了明显的服务效果。例如由国家和 11 个省、自治区、直辖市气象部门及有关科研单位协作开展的冬小麦遥感综合测产，经过 5 年科学研究和业务试验，分别提供冬小麦产量预报和苗情监测报告 10 余项，趋势预报正确、定量预报准确率达 95%左右，受到农业部门的好评。农业病虫害气象预报方面，各地气象部门针对水稻的稻瘟病、白叶枯病、纹枯病和小麦的锈病、赤霉病等，开展发生期、发生量预测，并对预报服务后的效益进行了评估，收效比较明显。在卫星遥感技术森林火灾监测方面也取得了成效。自 1985 年以来，应用气象卫星资料成功地对内蒙古和东北地区的火情进行了监测。尤其是在 1987 年 5 月 16 日至 6 月 2 日我国东北大兴安岭林区发生的建国以来最严重的森林大火中，气象卫星影像资料成功地监测了这次火灾的发生、发展和演变过程，在指挥灭火救灾工作中发挥了很好的作用。

第四节　农业气象学的基本经验

20 世纪以来，特别是近 50 年我国农业气象学从小到大逐步

发展，已初具规模，为我国农业生产持续稳定发展做出了贡献。回顾我国农业气象学的发展历程，有经验值得总结，有教训应该记取。

（一）农业气象学必须贯彻"科学技术必须面向经济建设，经济建设必须依靠科学技术"的战略方针，紧密与生产结合，更好地为农业服务

农业气象学是农业科学的基础学科，包括应用基础研究、应用研究和发展研究，在不同时期都应以不同的形式面向经济建设主战场，推动农业的持续稳定发展。例如我国的农业气象工作者利用局部地区气候条件，选择不同尺度的 3 种避寒类型，把橡胶树种到了北纬 18°～24°，栽植面积达几十万公顷，这是前所未有的创举。70 年代末从日本引进的塑料薄膜覆盖技术，已广泛应用在园艺作物、经济作物和粮食作物，由于改变了土壤的水热状况，增产增收，1998 年已发展到 880 万 hm^2。塑料大棚和日光温室发展也很快，1996 年面积已达 67 万 hm^2 以上，经济效益和社会效益显著。再从国外看，英国农业每年从气象预报中获得的经济效益达 2 000 万英镑，相当于农业气象业务费用的 100 倍。国内外的大量实践证明，农业气象学不仅可以为农业生产提供科学依据，而且可以转化为现实生产力，获得直接的经济效益和社会效益。

（二）农业气象学要借助基础科学和其他相关科学的最新研究成果，发展学科、服务生产

农业气象学是农业科学与气象科学的一门边缘学科。农业气象学与农业科学的分支领域，如育种学、栽培学、生理学、生态学、土壤学、昆虫学、病理学等有着密切的联系；与气象科学的分支领域，如气象学、气候学、大气物理学等也有密切的联系，是一个比较活跃的领域，具有多学科的人才优势和其他学科理论、方法的优势，如能加以吸收和利用，就可以取得新的科技成果。例如现代化温室环境自动控制技术研究，就是借助于电子学与自动控制技术，

研究了温室适宜作物生长发育的环境条件，包括温度、湿度的自动调节，灌水量及水温自动调节，CO_2 施肥自动调节及通风换气的自动调节等。近年来，还应用人工智能、神经网络等高新技术将专家系统引入温室管理、决策与咨询中，收到了显著的效益。例如荷兰现有玻璃温室 10 000 hm^2，占农业可耕地面积的 0.5%，其中蔬菜、花卉约各占一半，全部由计算机控制，模拟最佳的环境条件，确保高产优质高效，每年蔬菜出口创汇 10 亿美元，花卉出口创汇 15 亿美元，年营业额达 78 亿美元，平均每公顷温室年创产值 78 万美元。

(三)农业气象学要采用先进的仪器设备和理论方法，推进研究手段的现代化，以促进科技水平的提高

农业气象学是从实验科学发展起来的，许多重要科技成果的取得是借助先进的仪器设备和理论方法来实现的，这是科学技术现代化的一个重要标志。例如日本在电子显微镜观察下，发现低温破坏植物细胞的原因之一，是由于细胞膜系统遭到伤害，这里约有 4%～5%的蛋白质自膜系统游离出来，ATP 酶在膜的表面停止了活动。水稻抽穗期受到低温影响而造成不育，其原因是小孢子发育受到抑制，花粉的形成和发育受到伤害，花药不能开裂，最后导致不育。这些先进的研究手段深刻地揭示了低温冷害对作物危害的机制。当今农业气象的图像观察和微结构分析方面，应用了电子显微镜、X 光衍射技术、质谱、核磁共振技术；在精密定量分析方面，应用了各种光谱、气相、液相和气质联用技术；在宏观动态监测方面，应用了航测、气象卫星遥感技术；在多因子、大数据处理方面，应用了电子计算机技术等，这一系列现代的实验工具和高技术的应用，极大地提高了农业气象工作效率和科学研究水平。

(四)农业气象研究要统一规划，分工协作，组织跨部门、跨地区的科技力量联合攻关，以适应农业生产发展的需要

我国的农业气象研究工作主要分布在农业科研、农业教育和

气象系统。农业科研系统的农业气象研究工作主要侧重于农业气象条件、农田小气候、农业气象灾害防御及农业气候的研究;农业教学单位的农业气象研究工作主要依据自身优势,侧重于农业气象条件、农业气候和农田小气候的研究;气象系统的农业气象研究,主要是利用全国台站网和资料信息的优势,侧重农业气候资源调查和区划、农业气象灾变规律及农业气象预报服务的研究工作。但是,解决农业综合性的重大农业气象问题,还需要打破各自为政,单位所有的旧习,组织跨部门、跨地区的科研协作,组织联合攻关。例如"六五"、"七五"期间,组织北方地区低温冷害协作攻关,有农业、气象系统和教学单位的12个单位参加,通过实地调查和试验研究,初步查清了低温冷害的发生规律、类型、机制,提出了综合防御对策,并建立了科学实验基地,综合运用科技成果,取得了明显的经济、社会效益。又如组织的全国农业气候资源调查与区划,北方干旱、干热风和气候变化对农业的影响与对策等协作研究,发挥各自的优势,都取得了可喜的科技成果。

(五)农业气象学必须贯彻对外开放的方针,面向世界,面向未来,加强国际合作与交流,走一条具有中国特色的农业气象学发展道路

起始于19世纪后半叶的近代农业气象学,经历了1个多世纪的发展,对我国农业气象学的创立与发展产生了深刻的影响。1949年新中国成立后,特别是改革开放以来,我国的农业气象工作者在对外开放方针的指引下,认真学习和借鉴国际农业气象工作的经验与成就,如日本的农业气象灾害防御技术、设施农业技术;前苏联的农作物生育和产量预报、农业气候资源调查与区划技术;美国的作物气象模拟和全球作物产量预报技术,以及观测资料信息系统等,并结合我国实际,加以消化、吸收,积极开展创新试验研究,为我国农业气象学奠定了坚实的技术基础。为此,我们要继续执行对外开放的政策,通过多形式、多渠道加强双边和多边的联

系，请进来，派出去，把学习国外先进技术与经验同我国国情、大胆创新结合起来，在由传统农业向现代农业、粗放经营向集约经营转变的过程中，进一步调整方向、任务，拓宽研究领域，为实现党的十五大提出的“三步走”战略目标做出新的贡献。

第二章 农业气象基础

第一节 光与农业

太阳辐射是绿色植物通过光合作用制造有机养分的唯一能源,由于动物和许多微生物的营养依赖于绿色植物,因此,太阳辐射是一切生命的能量来源。农业生产就是在人为干预下将太阳能转化为人类可以利用的生物能的过程。太阳辐射也是地球表面的主要热量来源,在很大程度上决定着生物的生存环境。太阳辐射对农业生物的影响包括辐射强度、光照时间和光谱成分 3 个方面,研究农作物的光能利用率及提高途径,农业生物生长发育的适宜光环境及调控途径,历来是农业气象研究的一个基础领域。

一、光强与农业生产

大多数农作物对光照强度的要求较高,只有茶树、人参等少数作物相对耐阴。

(一)均匀作物群体内的光分布模式

设田间作物分布为均匀介质,太阳辐射在群体内衰减可用比耳(Beer)公式表示:

$$T = e^{-KF} = e^{-(|\cos\theta|/\sin\beta)\cdot\int_0^z f dz} \qquad (2-1)$$

式中 $K = |\cos\theta|/\sin\beta$,$K$ 称为群体消光系数,θ 为入射光与叶片法线方向夹角,β 为太阳高度角;$F = \int_0^z f\mathrm{d}z$,$F$ 为群体叶面积系数,可根据叶面积的分布逐层积分得出,z 为植株高度,f 为单位空间的叶面积,称为叶面积密度。

公式(2－1)表明作物群体内透光率随叶面积增大呈指数衰减。对于紧叶型小麦品种，叶片与茎秆夹角约为60°，当太阳高度角为60°时，消光系数为0.577。当植物生长繁茂时，实际观测值与上式计算值基本一致。但如群体内叶片分布不均匀时，可出现较大误差。

当β和F为常量时，随θ增大群体透光率T按指数函数增大；F值越大，θ的大小对于T的影响也越显著(图2－1)。选择θ较大的叶片直立型品种，有利于改善密度较大群体的透光率，这在作物的高产栽培上具有重要意义。

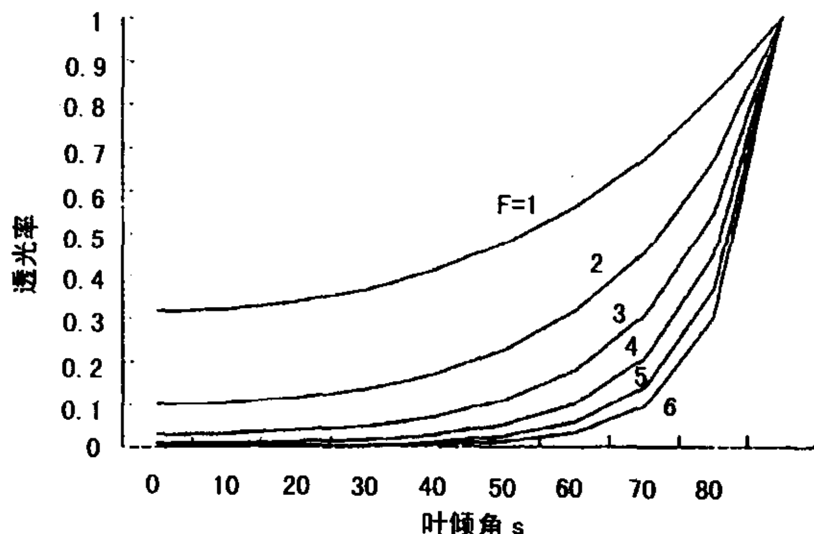


图2－1　不同叶面积系数F下的透光率随叶倾角s的变化

但当叶片与水平面垂直且F为常量时，群体内透光率T随太阳高度角β而增大，与θ的大小无关，水稻田的透光状况就是如此。当叶片呈水平状时，群体内透光率T仅随F增大，与β和θ均无关，甘薯和莲藕的群体透光状况即与此类似。

作物群体光分布模型是计算光合生产量的基础，而群体光分布主要取决于K和F这2个参数。如前所述，直接测定群体几何结构可确定K和F。另一种方法是研究叶丛结构，用分析法求出K与F的值。马增慰1988年提出了计算互不相关的随机叶片组

成，叶倾角相等的叶丛 K 及受光面积的方法，并由此得出计算叶面积散射光强的计算公式。刘国安提出了用实测透光率计算 F 和叶倾角概率密度的方法，有兴趣的可参阅有关文献。

（二）光斑、阴影和闪光

由于单叶光合作用速率与光强成曲线关系，以同一层次平均光强计算光合作用会产生较大的误差。研究群体光合作用经常需要分析光斑和阴影的比例及其对光合作用的影响。

群体内能够接收到直射光的部位表现为光斑，其余的阴影部位只能得到少量透射光、反射光和散射光。光斑处的光强一般比阴影处大 4～5 倍，以可见光为主，对于光合作用的贡献较大；阴影处以绿光、红外光及蓝紫光为主且较弱。

由于叶片各部分厚薄不匀，太阳本身又有 16′的视角，叶片边缘附近可见到的不是整个太阳，在田间观察时光斑和阴影的界限不是截然分开的，可进一步分为全光斑区、半阴影区与阴影区等。为此有人提出了照度叶面积的概念，指群体中能为阳光直接照射到的叶面积，表示为 $LAI_{光}$。

$LAI_{光}$ 与太阳高度角 $h_{\odot}$、全田叶面积系数 LAI 及垂直分布，特别是上层的叶面积系数 $LAI_{表}$ 有关。

$$LAI_{光} = a \cdot e^{-b \cdot LAI}$$

式中　a,b 为统计分析时的回归系数。

$$LAI_{光} = LAI_{表} \cdot e^{-K \cdot LAI} \qquad (2-2)$$

对于 LAI 为 2.5 的水稻田，当 $h_{\odot}<20$，$LAI_{光}=0.50\sim0.63$，为 LAI 的 20%～25%；当 $h_{\odot}>30$，$LAI_{光}=0.88\sim1.13$，为 LAI 的 35%～45%。

对于群体中下部叶片还应考虑叶片随风摆动，造成短时间光暗交替形成闪光的影响。据试验，在周期 6～7 s 秒的闪光下，黄瓜要比连续光照下增产 50%，萝卜增产 200%。原因是在光合作

用过程中既有光反应，又有暗反应。在光反应中产生具有还原力的 ATP 及还原型辅酶Ⅱ NADPH$_4$，可以在暗条件下把 CO_2 还原成碳水化合物。闪光的光暗交替正好使光照下叶绿素吸收可见光产生的这些物质在不受光时用于暗反应，从而提高了光合效率(图 2－2)。由于暗反应进行较慢，在连续光照下不能充分利用的光量子被转化为热能而浪费了。

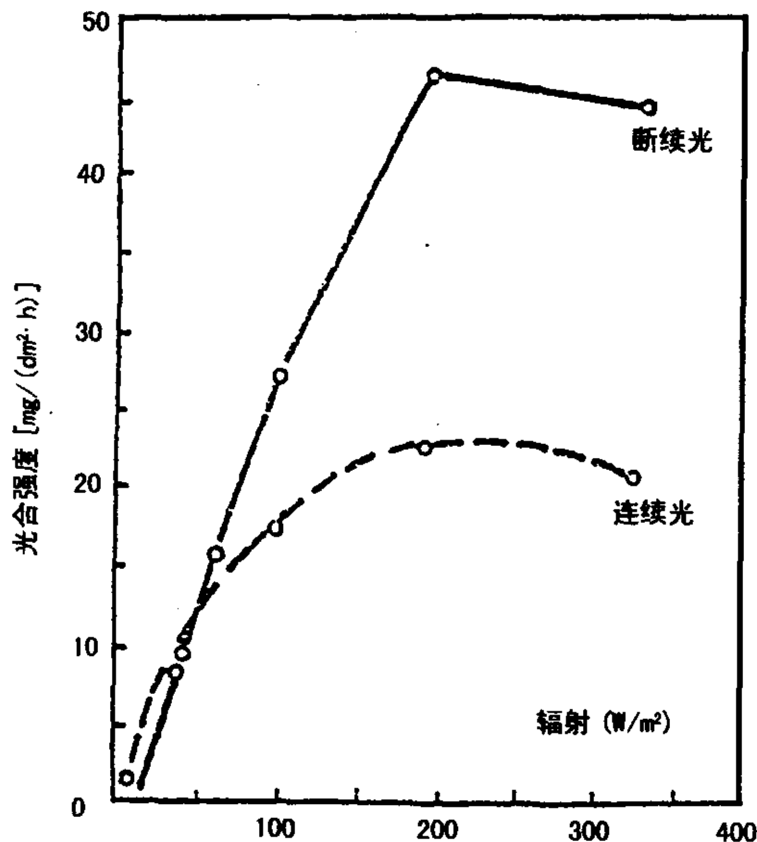


图 2－2　葡萄叶在断续光与连续光下光合强度的比较(断续光的光谱周期为 0.05～0.20 s)

闪光的频率受风速和叶片坚韧性的影响。风速大时叶片摆动频繁，上层叶片更易随风振动。叶片的振动还与品种特性及老化程度有关。

(三)光照强度的农业气象指标

光照强度的指标包括光合作用的光饱和点和光补偿点。

光饱和点指在一定光照强度范围内，植物的光合作用速率随光照强度加大而加大，当光照强度达到某一数值，光合强度不再增大，这时的光照强度即光饱和点。

光补偿点指植物光合速率与呼吸速率达到平衡时的光照强度。在补偿点以上，植物的光合作用大于呼吸消耗，能够积累有机物质；在补偿点以下则入不敷出，长期处于弱光下会导致营养枯竭而衰亡。

光饱和点和光补偿点与植物的种类有关，喜阴植物如深水藻类在海平面只要有全光照的1/10就可达到光饱和，而喜阳植物如沙漠和高山植物在中午强烈直射光下还没有达到光饱和。通常C_4植物的光饱和点较高，补偿点较低。几种主要大田作物的光饱和点与光补偿点见表2－1。

表2－1 几种作物的单叶光饱和点与光补偿点

指标＼作物	小麦	棉花	水稻	烟草	玉米
光饱和点(万 lx)	2.4～3	5～8	4～5	2.8～4	2.5～4
光补偿点(lx)	200～400	250	600～700	500～1000	—

由于叶片间的相互遮蔽，作物群体的光饱和点要远高于单叶，如小麦在初夏中午10万 lx 的强光下，下部叶片的光合作用随光照增强而加大，整个群体仍未达到光饱和。

由于呼吸作用随温度升高而加剧，光补偿点随温度升高而提高。温室光照不足时应降低室温以降低作物光补偿点和减少养分消耗。在较弱的光照下，上部叶片仍能进行光合积累，但下部叶片呼吸消耗已超过光合积累。群体的光补偿点即上层叶片光合强度与下层叶片呼吸强度平衡时的光照强度，要明显大于单叶的光补偿点，通常为1 000～2 000 lx。

透光率的分析对于作物的高产栽培具有重要价值。漏光过多不能充分截获光能,也就谈不上高产。但叶面积系数过大严重郁蔽,会使下部叶片处于光补偿点之下,降低群体的净光合速率。作物群体透光率可用以判断群体大小是否适宜。

群体光合积累不但取决于足够和适宜的叶面积,而且取决于叶面积的维持时间。光合势和叶日积常用来表示作物群体光合生产能力的大小。前者即作物生育期间进行光合作用的叶面积与天数的积分,单位是平方米·日($m^2 \cdot d$);后者是叶面积系数与生育期天数的积分。

$$光合势=\int_0^T L(t)dt \quad 或 \quad 叶日积=\int_0^T LAI(t)dt \qquad (2-3)$$

植物生长发育的不同时期对光照强度的敏感程度不同,对植物生长发育和产量影响最大的时期称为光照强度的临界期。禾谷类的光照强度临界期一般在孕穗期,即花粉母细胞四分体到花粉粒形成期的26～28天内。遮光试验表明,此时期光照强度不足将导致严重的小花退化和粒重下降。对高产小麦孕穗期测定,1/2株高处的光强达到5 000～6 500 lx时,小花成花率可达25%。

(四)辐射截获率的测定及其在作物光合生产中的应用

光合势和叶日积的提出缺乏严格的物理基础,实际应用中的误差也较大。叶面积过大时单位叶面积的光合生产率要比苗期小得多,连阴天的光合势有效性更差。英国 Monteith 教授指出:作物净光合积累不直接取决于叶面积系数,而取决于植被对太阳辐射的有效截获总量。此说不但抓住了问题的本质,计算也大大简化了。

太阳辐射截获率 Ic 可通过在植被上方和地表各设一管状水平辐射仪测得,制成长管状可将光斑和阴影都包括在内,以便测得平均的辐射状况。Ic 的计算公式如下:

$$Ic = 1 - \frac{S_d}{S_u} \qquad (2-4)$$

式中 S_d 和 S_u 分别是植被下方和上方的太阳辐射强度。实际所截获辐射为 $Ic \cdot S_u$，计算时对时间积分取日总量。

为避免温度对光合作用的影响，设计试验在加温温室中进行，保持各温室内日平均气温基本恒定。设室外太阳辐射强度为 S，则 $S_u = T_g S$，其中 T_g 为温室透光率。

郑大玮在英国以高粱为实验材料进行此项试验，从出苗到收获定期取样测定叶面积和干重，统计分析单位面积作物干重增长 D_m 与所截获太阳辐射量之比，成良好线性关系。

$$D_m = -65.43 + 2.077 \times 10^{-6} Ic \cdot S_u \qquad (2-5)$$

如将 D_m 按每克 17 765 J 折算成能量单位，则式(2－5)中斜率成为对所截获光能的利用率。本试验中

$$\varepsilon = 2.077 \times 10^{-6} \times 4.25 = 0.0369,$$

即 3.69%。

对于植被上方的太阳辐射，群体光能利用率为 $E = \varepsilon \cdot Ic$。ε 应是比较稳定的，仅在幼苗期和成熟前略低，如其他条件满足，可看成是品种的生物学特性。实际光能利用率 E 主要取决于太阳辐射截获率，并与之成正比。

实际上植被上下方辐射之比还并不完全反映截获状况，这里是将叶面反射率和不能被叶面吸收的非光合有效辐射率看作常数来对待的。

辐射截获率与叶面积有关，但并不是叶面积越大越好。这是因为：①叶面积过大时辐射截获率接近于 1，不再随叶面积增大。②即使生物学产量仍保持较高水平，多数作物的经济产量也将随经济系数下降而减少。一般禾谷作物以最大截获率 95% 为宜，可接近最大经济产量，过于郁蔽将增加倒伏风险和降低经济系数。③作物一旦倒伏，尽管叶面积系数仍很高，但实际截获辐射大幅度减少，加上呼吸消耗增加，产量必然急剧下降。

全生育期的平均截获率为：

$$\overline{Ic} = \frac{1}{T}\int_0^T Ic \cdot \mathrm{d}t \qquad (2-6)$$

式中　T 为生育期天数。

辐射截获率 Ic 与叶面积系数 L 成复杂的曲线关系，本试验在无倒伏条件下可拟合如下：

$$Ic = 1 - e^{-0.719-0.15956L+0.31065/(L+0.432)} \qquad (2-7)$$

式中　L 为叶面积系数。$L\to0$ 时，$Ic\to0$；$L\to\infty$ 时，$Ic\to1$。L 较小时，Ic 随 L 增大而迅速增大；L 较大时，Ic 增加变缓甚至饱和。

式(2－5)可简写成：

$$D_m = D_0 + \varepsilon \cdot Ic \cdot S_u \qquad (2-8)$$

式中　D_0 为初始干物重。由于禾本科植物三叶期以前以消耗胚乳养分为主，光合积累很少，在线性回归时 D_0 可能出现负值，但这并不影响对 D_m 的计算。由式(2－8)可以看出提高产量的途径。

增加辐射总量 S_u 受到气候条件的限制，但如利用保护地育苗或延后生产，可利用低温时期的辐射；改善灌溉可提高对旱期辐射的利用率。

提高净光合效率 ε 主要靠育种和创造适宜的环境条件，包括防治病虫害。ε 还与温度有关，应调节田间小气候，使温度尽可能接近作物光合作用的适宜范围。

提高整个群体辐射截获率 Ic 的途径：①防止缺苗，使植被尽可能充分覆盖地面；②提高苗期叶面对地面的覆盖度；③培育理想株型的品种，即上部叶片直立以减少反射和避免光饱和，中部叶片倾角加大以充分截获光能，下部叶片平展以尽可能减少漏光。

当前大面积生产上影响产量的主要因素还是水肥不足，从而影响到叶面积不足，导致 Ic 过小；其次是作物苗期对辐射的截获率很低。通过合理地间套作、选用早发品种、合理密植、育苗移栽，都可以提高苗期的辐射截获量。

植物干重增长与辐射截获率成正比不是任何情况下都成立的,因为影响光合作用的因素很多,不同作物和品种间的叶片光学特征也是有差异的,只能是在其他环境因子固定的情况下,针对某一作物和品种来建立其关系式。至于呼吸消耗,已在计算净干物质增长时扣除。值得注意的是作物成熟前叶片逐渐黄落,反射率增大,同样 Ic 的 ε 要降低,D_m 与 Ic 线性关系的斜率将下降。

上述试验是在控制条件下,特别是水分满足和温度恒定的条件下进行的。进行控制环境试验可确定其他因子对 ε 的影响。由于英国全年气候温和,又以种植小麦、大麦等喜凉作物为主,春夏季温度下光合生产率变化不大,Monteith 主持的田间试验多次验证了 D_m 与 Ic 的线性关系。但我国气温的年较差大,不同作物光合作用对温度的要求差别很大。在已明确 D_m 与 Ic 成线性关系的前提下,进行同一作物的分期播种试验和连续定期观测 D_m、Ic、LAI 及辐射、气温,可以分温度段建立如式(2-5)的关系式,求出气温与 ε 的关系,这对于育种工作中筛选耐高温或耐低温的品种将是有很大价值的。

(五)光合作用的量子效率

光合作用的量子效率 Eq 表征光合作用中光量子的能量转换效率,在数量上等于植物同化 1 mol CO_2 固定的能量 Ec 与转化 1 mol 产物所需光量子能量 El 的百分比,即:

$$Eq = \frac{Ec}{El} \times 100\% \qquad (2-9)$$

Eq 的大小与同化 1 个 CO_2 分子所需光量子数(即量子需要量 n)和光合有效辐射光谱的波长有关,n 一般取 8~10。在光合有效辐射的波长范围内(380~710 nm),1 mol 光量子的平均能量通常取 209.34kJ,而每摩尔碳水化合物的贮存能量为 468.92kJ,当光合作用的量子需要量为 10 时,量子效率 Eq 为:$Eq = 468.92/10/209.34 \times 100\% = 22.4\%$

光合作用的量子效率表明植物吸收光能时,有很大一部分被转化为热能而浪费了。在植物的光合作用过程中,起主要作用的是红光和蓝光,其理论量子效率分别是33%和22%。蓝光的量子效率比红光低是因为每摩尔光量子的能量要比红光高。

(六)群体光合强度的计算

多数大田作物是喜光的,弱光下不但导致减产,而且会影响到其品质。据研究,小麦籽粒蛋白质含量与抽穗到蜡熟的日照时数长度相关。但有些植物的品质在弱光下较好,如烟草以全日照的35%光强下的品质为好,云贵高原因此成为中国优质烟的产地。人参栽培需要搭棚,三七、黄连、金鸡纳霜等药材的栽培也需要遮阴。咖啡、可可和茶树也需要弱光。

(七)群体光合强度的计算

日本的门司和佐伯1953年提出单叶光合强度的经验计算公式:

$$P = \frac{bI}{1 + aI} - r \tag{2-10}$$

式中　P 为单位叶面积的光合强度;I 为叶面受光强度;r 为单位叶面积的呼吸强度;a,b 为统计参数。设 I_0 为自然光强,I 为叶面深度 F 处水平面上的平均光强,将比耳公式代入并将 P 对叶面积的深度积分,可得到:

$$P_{总} = \int_0^F \left\{ \frac{b\, I_0\, e^{-KF}}{1 + a\, I_0\, e^{-KF}} - r \right\} dF$$

$$= \frac{b}{aK} \ln \left\{ \frac{1 + a\, I_0}{1 + a\, I_0\, e^{-KF}} \right\} - rF \tag{2-11}$$

对于丰产麦田曾获得 a 为 $\rho(CO_2) = 0.125\ g/(m^2 \cdot h \cdot klx)$,$b$ 为 $\rho(CO_2) = 0.055\ g/(m^2 \cdot h \cdot klx)$。如再取得 r,F 和 K 的数值代入式(2-11),就可计算出 $P_{总}$ 的数值。

马增慰1992年指出式(2-11)只有在忽略叶片透射率和呈叶

片完全水平状态时才成立，当考虑叶片透射率 m 时，应改写为：

$$P_{总} = \frac{b}{aK}\ln\left\{\frac{(1-m)+aKI_0}{(1-m)+aKI_0\cdot e^{-KF}}\right\} \qquad (2-12)$$

李赋镐在80年代对群体最大光合量做了理论计算，可估算作物群体的不同发展趋势及最终产量。近年来国内计算光合作用的模型还有很多，读者可参阅有关文献。

二、光周期与农业生产

（一）光周期现象和类型

光周期指昼夜光照与黑暗交替及其对植物发育，特别是开花结实有显著影响的现象。光周期对植物的贮藏器官形成、叶片形态、落叶和休眠也有很大的影响。

光周期现象是美国W·W·加纳尔和H·A·阿拉德1918年通过对烟草和大豆做不同光照长度处理的实验发现的，他们在1920年发表的论文中首次提出了成花诱导取决于日照长度的理论。进一步的研究证实不同作物和品种对光周期的反应有很大差别，并查清成花反应中感受光周期信号的部位是叶片。根据开花对光照长度的要求可将植物分为长日性植物、短日性植物和光期钝感植物3类。使植物通过光周期能开花的最长或最短的光照长度临界值称“临界光长”。对于短日性植物，临界光长指其所需光照长度的上限；对于长日性植物则指所需光照长度的下限。大多数植物要求的临界光长为12～14 h。此外还有一些特殊植物类型，中日照植物只在一定范围的光照长度下才能开花，光照延长或缩短都会抑制开花。长、短日照植物先要求长日照，后要求短日照才能开花。短、长日照植物则反之。常见的长日性植物有小麦、大麦、油菜、豌豆、甜菜、胡萝卜、菠菜等，大多原产高纬度地区。短日性植物有水稻、玉米、大豆、高粱、棉花、甘薯、烟草等，一般原产热带和亚热带地区。光期钝感植物有番茄、黄瓜、菜豆、荞麦等。一些早

熟的棉花、玉米品种也对光照长度不敏感。草莓在15℃以下为长日性植物，在较高温度下却成为短日性植物。

1938年德国K·C·哈默和J·邦纳发现，控制花芽分化不是光期长度，而是暗期长度。暗期中用很低能量的闪光打断，暗期效果就会被抵消而不能成花。后来美国科学家又发现了可在不同波长光照下以两种形态相互转换的光敏色素，并于1961年成功分离出来：

$$P_r = \xrightarrow{\text{红光}} P_{fr} \xrightarrow[\text{远红光}]{\text{黑夜或}} P_r \quad (2-13)$$

红光可促进长日性植物的发芽和开花，抑制短日性植物的发芽和开花，远红光的作用则与此相反。P_r型色素对红光吸收强烈，对蓝光吸收很少。P_{fr}为远红光吸收型色素。

(二)植物的感光性

感光性是植物的发育速度对光照长度的反应特征。除可划分为长日性植物、短日性植物和光期钝感植物3类外，同一类植物还有感光性强弱之分。感光性的强弱除可以用临界光长判断外，还可用感光系数衡量。感光系数指播种期每相差1天，相应的播种到抽穗期天数的差值。1977年南京市农业科学研究所对不同水稻品种感光系数的推算如表2－2，可用于合理安排安全播种期和移栽期。

表2－2　南京地区不同水稻品种的感光系数

品种	早籼	早中熟粳	中粳	早熟晚粳	晚粳
类型	二九青	农植69	南粳33	沪选19	农虎6号
感光系数	0.05	0.37	0.35	0.51	0.71
感光性	弱	中	中	中强	强

自然光照下，植物光周期反应所需的光照强度是很微弱的，如

水稻在 8～10 lx，大豆在 6.5 lx 下就具有光周期反应。但强光的光周期效应要比弱光大得多。

植物的不同发育阶段感光性是不同的。吴兰佩 1959 年提出冬小麦以二棱期到小花原始体期受光长的影响最为显著。华南晚粳黄禾子为出苗后 35～45 天，晚熟玉米品种为雄花序生长锥到雌蕊突起出现期，芝麻为出苗后 10～24 天。据刘汉中 1979 年研究，许多中晚熟大豆品种除出苗到开花期受光长的显著影响外，开花到成熟期间光照长度对发育也有明显的影响，有的品种所受的影响更甚于开花前。

光周期对植物的生长和形态建成也有很大影响，有的马铃薯品种在长日照下不能形成块茎，短日照可抑制洋葱鳞茎形成，洋麻叶片在长日照下呈掌状且凹陷深。短日照还有促进乔木落叶和休眠的作用。

三、光谱成分与农业生产

(一)太阳光谱的生物效应

太阳辐射光谱按照波长的长短可色散为无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线和宇宙射线等。其中能量密度最大的波长为 475 nm，由此向短波方向能量密度急剧降低，向长波方向则缓慢降低。短波光在大气层中的穿透能力要比长波光差得多。在海拔较高地区，紫外线和蓝紫光的比例较大，使植物变矮，叶片变厚，色泽较鲜艳。在干燥洁净的大气层或碧空中漫射辐射以蓝紫光较多，能量最大值在 420～440 nm 处。当空中尘埃或水汽较多时，漫射辐射具有最大能量的波长向短波方向转移。太阳高度角越低，穿透大气层的路径越长，漫射辐射中长波辐射的成分越多。曙暮光由大气对太阳辐射的散射形成，光谱成分与太阳高度角很低时的天空漫射相似，以长波的红橙光为主。天空漫射辐射的能量分布与太阳高度角的关系见表 2-3。

表 2-3　天空漫射辐射的能量分布与太阳高度角的关系

波长 λ (nm)	太阳高度角 $h_{\odot}$					
	90°	60°	45°	30°	15°	3°
<400	25.8	24.6	23.2	20.4	14.6	5.9
400~600	53.5	54.2	54.8	56.1	58.2	53.3
>600	20.7	21.2	22.0	23.5	27.2	40.8

(二)光合有效辐射(PAR)

PAR 即绿色植物进行光合作用时，能被叶绿素吸收参与光化学反应的太阳辐射光谱成分，波长范围是 380~710 nm。不同色素对各种波长光的吸收利用是不同的，如叶绿素 a，b 的吸收光谱有 2 个光合高峰，分别在 600~700 nm 和 400~500 nm。

光合有效辐射占太阳辐射的比例与太阳高度及大气状况有关。太阳高度越高和晴天时比例较大，太阳高度低和阴天时的比例较小。用以下简便公式计算，误差一般不超过 3%：

$$Q_{\Phi} = 0.43S' + 0.57D \qquad (2-14)$$

式中　Q_{Φ} 为光合有效辐射；S' 为水平面上的太阳直接辐射；D 为漫射辐射。

实测表明式(2-14)中的系数不是固定不变的，国内外提出了不少改进方法。如周允安根据北京市测得的光合有效辐射值，提出以下的经验公式：

$$Q_{PAR} = (3.383 + 0.058 \quad \lg E^* + 0.047N)Q \qquad (2-15)$$

式中　$E^* = P \cdot E/P_0$，P_0 和 P 分别为标准大气压和测点气压，E 为地面水汽压，单位都是 hPa；N 为总云量，以小数表示。式(2-15)可用于估算日、旬或月总量。

绿叶反射率、透射率与波长之间的理想化关系见图 2-3。

(三)热辐射

太阳辐射中能产生热效应的光谱成分，主要是红外线(760~

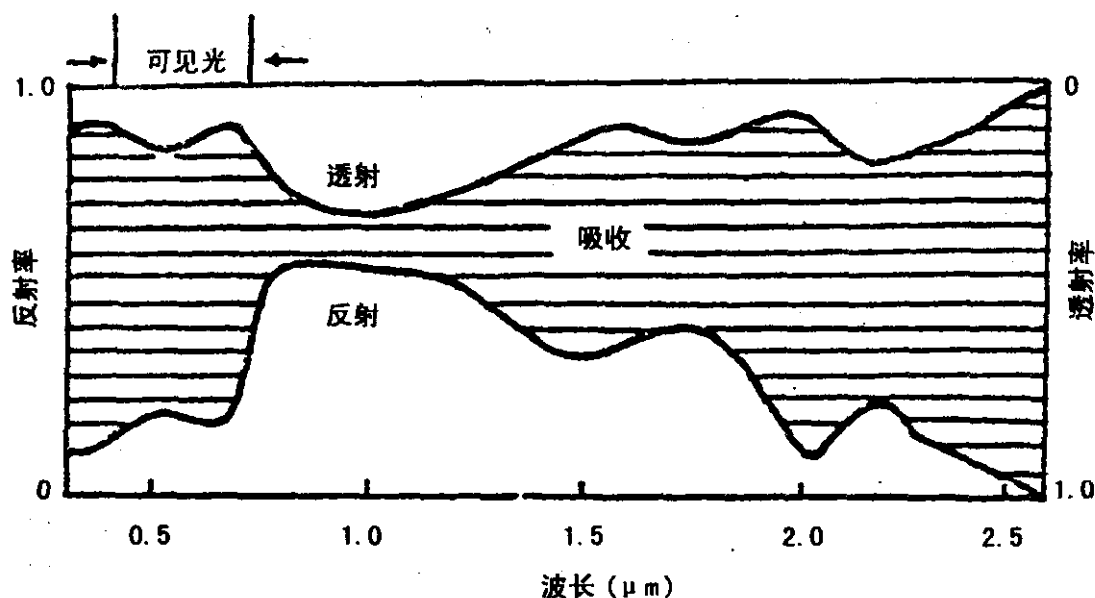


图 2－3　绿叶反射率、透射率与波长之间的理想化关系
（据 Monteith 1965）

3×10^6 nm）。其中波长在 1 050 nm 以上部分可以为植物所吸收，尤其 5 000～6 000 nm 部分能被原生质、水和细胞其他成分所吸收，是影响植物热力状况的重要因素，也是植物蒸腾作用的能量来源。外界环境温度越低，红外线的热效应也越显著。在高海拔地区，红外线的热效应可使叶温高于气温 3～5℃以上，可以补偿高原地区气温低的不利因素。

到达植物表面的红外辐射通常占到太阳总辐射的 50%左右，其中 15%被反射，约 12.5%穿透叶片，22.5%被叶片吸收。透过叶片的“红外荫”易使植株徒长。叶片吸收红外线，除蒸腾耗热外，也以叶面辐射的方式向周围释放，影响植株附近的小气候环境。

（三）紫外辐射

波长为 10～400 nm，其中小于 290 nm 的短波紫外线对植物有杀伤作用，称“灭生性辐射”，大多数高等植物和真菌在其照射下立即死亡。臭氧 O_3 能强烈吸收短波紫外线，实际到达地面的短波紫外线已十分微弱。290～315 nm 的紫外线对生物有一定伤

害，可用于土壤消毒和病虫害防治。315～400 nm 的紫外线对植物无害，而具有成型作用，使植株矮小，叶片变厚，果品色泽鲜艳，糖分增加。但茶叶和人参要防止紫外线辐射才能获得优质。

四、光与畜牧业生产

(一)太阳辐射对动物热平衡的影响

高温下太阳辐射能加重畜禽体的热应激，低温下则可缓解冷应激。太阳辐射中的红外线可穿透皮肤几厘米，促进血液循环，加速新陈代谢和细胞再生，兼有镇痛、消炎和促进伤口愈合的作用。但过量照射可导致皮肤灼伤。红外线和红光还能穿透颅骨，使颅温升高，大脑损伤，导致焦躁、头疼，甚至昏厥、痉挛等日射病症状，严重的可导致死亡。

动物可通过改变体姿和方位来调节对太阳辐射的截获量。家畜皮毛在冬季可保温，炎夏可隔热。家畜的热调节能力与遗传因素有关，如原产南亚的瘤牛具有很强的耐热能力，在高温下产奶量下降不明显。原产欧洲的黑白花牛不怕低温，但在高温下泌乳急剧下降。人工调节畜禽舍的环境，使之处于舒适的舍温下，可以提高畜牧生产效率。

(二)光照强度对畜禽繁殖和生产力的影响

适宜的光强可促进母畜正常发情、排卵，保障仔畜的健康和促进发育，从而提高畜牧生产力。光照不足或过量会使畜禽焦躁不安。家禽对光强更为敏感，鸡在低于 5 lx 时，产蛋率急剧下降。适宜的光强还可提高动物的杀菌能力和机体免疫力。

(三)光照长度对畜禽繁殖和生产力的影响

许多动物的性活动和繁殖受到昼夜交替和日照长短的影响，同样存在光周期现象。马、驴等在日照较长的春夏发情、配种，称“长日性动物”。绵羊、山羊、骆驼等在日照渐短的秋季发情和配种，称“短日性动物”。但不论是长日性动物还是短日性动物，产仔

都是在温暖季节。采用人工光照处理或遮阴可以改变动物的繁殖季节,以满足人类的生活需要。

日照长短对家禽的性成熟和产蛋率影响更大。每日光照时间3 h鸡蛋的受精率不足1%,延长到13 h可提高到91%。

日照长度对公畜的影响不如母畜显著。但光照不足也会影响精液的质量。春季日照延长对公禽精子生成有促进作用,秋季日照缩短则有抑制作用。

表2-4 紫外线照射对产蛋鸡的影响

组别	剂量[MeV/($h\cdot m^2$)]	相对产蛋率(%)	产蛋量相对值(%)	蛋壳重相对值(%)	死亡率相对值(%)
对照	0	100	100	100	100
Ⅰ	66	115	113.41	111.92	50
Ⅱ	330	122	108.91	127.50	27

(四)光谱成分对动物的影响

320～400 nm的紫外线具有色素沉着作用,可使动物皮肤变黑,防止红外线的过深穿透。275～300 nm的紫外线具有杀菌和抗佝偻病的作用。200～275 nm的紫外线杀菌力量强,对机体细胞也有强烈的伤害。适量的紫外线照射可使畜禽中枢神经兴奋,增强抵抗力和免疫力,降低发病率和死亡率,提高生产性能。但过量照射会引起光照性皮炎和眼炎。

不同光色对动物行为的影响不同,红光对公牛的刺激作用是众所周知的。可见光不同成分对鸡的生产性能的影响如表(2-5)。

表 2-5 光色对鸡生产性能的影响

项目	光色					项目	光色				
	红	橙	黄	绿	蓝		红	橙	黄	绿	蓝
促进生长				△	△	减少啄癖	△				
降低饲料利用率			△	△		增加产蛋量	△	△			
缩短开产日龄				△	△	降低产蛋量			△		
延长开产日龄	△	△	△			增加蛋重			△		
镇静作用	△					提高公鸡繁殖力				△	△
使瞳孔变大					△	降低公鸡繁殖力	△				

第二节 温度与农业生产

一、温度与农业生物及农业生产的关系

温度是农业环境的一个重要因子，不但直接影响农业生物的生命活动，而且还通过作用于其他环境因子而间接影响农业生物，温度还影响许多农事活动的进行。

(一)植物的温度三基点和范霍夫定律

任何生命活动都要在一定温度范围内进行，生物的每一种生命活动都有其最高温度、最低温度和最适温度，称为“三基点”。恒温动物能保持体温在最适水平，但其能力又受到外界环境的限制，环境温度过高或过低时不能维持正常体温，实际上也存在一定的温度范围。植物、变温动物和微生物都以适温下生命活动最活跃，低于最低温度或超过最高温度，生长发育都要停止。在三基点以外还存在最低致死温度和最高致死温度，合称“五基点温度”。

不同生物的三基点或五基点温度是不同的，几种主要作物的三基点温度如表2-6。

表2-6 几种作物的三基点温度(℃)

温度 \ 作物	小麦	玉米	水稻	棉花	烟草	豌豆
最低温度	3～4.5	8～10	10～12	13～15	13～14	1～2
最适温度	20～22	30～32	30～32	28	28	30
最高温度	30～32	40～44	36～38	35	35	35

同一种生物的不同发育期及不同生物过程的三基点温度不同。如水稻秧苗生长要求水温13～15℃以上，但灌浆期要求20℃以上。植物生长的三基点温度与光合作用的三基点温度并不吻合，有时在一定低温下不能进行光合作用，但仍有微弱生长。通常呼吸作用的下限温度低于光合作用的下限温度，但最大呼吸作用的温度又高于光合作用的最适温度。

在最适温度以下，温度对主要生命过程的影响服从范霍夫定律(Van't-hoff)：

$$Q_{10} = K_{t+10}/K_t = 2 \quad (2-16)$$

式(2-16)说明化学反应温度每升高10℃，反应加快1倍。式中K_t与K_{t+10}分别为温度t与$t+10$时的化学反应速率；Q_{10}为温度提高10℃后与原温度下反应速率的比值。范霍夫假定Q_{10}应等于2，根据这一定律，反应速率应随温度升高而按指数关系增长。

$$\frac{K_2}{K_1} = 2^{\frac{(t_2 - t_1)}{10}} \quad (2-17)$$

植物生长与酶的催化反应密切相关，因此植物生长的温度曲线近似于酶的温度关系曲线。酶的Q_{10}一般大于2，但其生物化

学反应与一般化学反应不同，温度较低时 Q_{10}大于 2，反应速率随温度上升而迅速加快。通常在 15℃到 20～30℃之间反应速率随温度上升而稳定增加，越过最适温度点反应速率反而下降，直到死亡。这是因为超过最适点酶本身会变性，催化能力下降。

（二）温度对作物生长、产量和品质的影响

喜温作物的发芽温度高于喜凉作物，10℃的较低温度在小麦种子发育期可诱导深而长的休眠，也能在发芽时打破休眠；20℃对休眠程度不同的品种发芽的影响有很大差别；30℃高温只能使无休眠或休眠水平很低的品种发芽。我国小麦穗发芽多出现在麦收时低温连阴雨年份，以白粒小麦品种发生较重，红粒小麦品种则较轻。

作物的不同生育期间要求不同的最适温度，只要环境温度能充分满足作物需要就能高产。如北京市冬小麦历年亩产与旬平均气温的积分回归统计分析表明，冬前、初冬和早春温度偏高，春末和初夏温度偏低有利于增产，但四川盆地冬暖却可加重旱情，对小麦产量有负效应。

作物粒重是灌浆速率对灌浆时间的积分，在一定范围内温度偏低可延长灌浆期，但日灌浆速率下降；温度偏高则反之。温度条件是否有利灌浆要具体分析。小麦在多数情况下气温偏低时，虽然日灌浆速率有所下降，但灌浆期延长，仍导致最终粒重的提高。因此高纬度和高海拔地区的小麦通常易获得大粒种子。

温度对作物品质的影响有多种表现，草莓在形成甜味和红色时要求中等到较高温度，但在形成特有香味时要求 10℃左右。温度日较差大有利于糖分积累，这是哈密瓜和吐鲁番葡萄香甜举世闻名的主要原因。吐鲁番的葡萄干品质好还得益于夏季干热能很快自然风干。番茄开花受精如遇低温易形成畸果，春播小萝卜在春寒年易分杈，纤维多，品质也较差。

（三）土温对作物的影响

大多数作物以根区土温在 20～30℃时生长量最大。土温对

作物生长发育的影响表现如下：

(1)水分吸收　据测定，2个月苗龄棉株10℃时吸水量仅为20℃时的20%，主要原因是低温增加了水的粘滞性，降低了细胞质膜的透性，又间接影响了气孔阻力，从而限制了光合作用。

(2)养分吸收　低温减少了作物对多种养分的吸收。以30℃和16℃土温条件下48 h短期处理做比较，低温影响水稻对矿物质吸收的顺序是：磷、铵、硫、钾、镁、钙；但长期冷水灌溉降低土温3～5℃后，影响顺序为：镁、锰、钙、氮、磷。土温不但影响根系活动，还影响土壤养分的转化及微生物对养分的利用。

(3)块茎和块根形成　马铃薯苗期土温高生长旺盛但并不增产，中期如高于28.9℃不能形成块茎，以15.6～23.9℃最适于块茎膨大。土温低时块茎多而小，土温适宜块茎少而大，土温过高块茎少而小，减产更严重。

(4)生长发育　植物茎叶覆盖使生育后期的土温比裸地昼凉夜暖。据廖宗族考察，西藏地区按气温指标已不能种植的海拔4 460～4 750 m处仍有春小麦，用地温指标就能很好地解释。

(四)温度对变温动物生命活动的影响

与农业生产有关的变温动物包括若干昆虫、鱼类、软体动物、爬行动物和两栖动物，其体温随外界环境而改变。如海洋无脊椎动物的体温与水温只相差0.2～0.6℃，幼鱼体温与环境水温几乎相等，成鱼也只相差0.5～1℃。

有些低等动物能耐很低的温度，玉米螟幼虫可在－30℃下生存，加拿大一种小麦茎寄生蜂可处于－47℃的过冷却状态而不冻结。

蚕茧因有茧壳保护，在5～10℃下越冬可贮藏4～5天，但长期低温仍将致死。幼蚕虫龄越小越不耐低温，20℃以下部分死亡，较大的蚕也不耐15℃以下低温。

低等动物可通过自身行为或迁移调节体温以适应环境，沙漠

蝗虫在较低温度下身体与阳光垂直，气温 39～43℃时身体改为与阳光平行以减少吸热。蜜蜂冬季常蜂拥成团保护蜂王和幼虫，可使巢内温度比外界高出 10℃；夏季则从外界吸水湿润蜂巢，并振翅促进蒸发降温。大多数昆虫具有冬眠习性，以卵或蛹在土壤或秸秆中过冬。金针虫早春随土壤化冻由深层向表层移动咬食麦根，春末升温后又潜入深层。蝗虫和粘虫靠迁飞来适应温度的季节变化。

鱼类耐高温所需要驯化时间较短，耐低温所需驯化时间较长。原产高纬度水域的鱼类较耐低温而不耐高温，原产低纬度水域的反之。同一种生物夏季较耐高温，冬季较耐低温。绝大多数无脊椎水生动物在温带的冬季都有休眠现象。一些海洋鱼类具有季节性洄游习性。

温度对水生生物的摄食、营养、生长、发育和繁殖有很大影响。草鱼在 5～7℃以上开始摄食，20℃以上摄食量急剧增加，27～30℃摄食强度最大。以适温下饵料效能系数最高。

(五)温度对畜禽生命活动的影响

畜禽等高等动物能在一定范围内保持体温不变。禽类的体温要高于畜类。不同畜禽的肛温如下：牛 38.3℃、绵羊 39.1℃、猪 39.2℃、兔 39.5℃、山羊 39.9℃、火鸡 40.5℃、鹅 40.6℃、鸭 41.1℃、鸡 41.7℃。成龄畜禽体温要下降 0.8～1℃，在进食、发情、运动及妊娠结束时升高，饥饿、寒战后和大量饮冷水后体温降低。

根据环境温度对畜禽的影响与畜禽的适应性反应，可将环境温度作以下区分：

恒温动物主要借助物理调节就能维持正常体温的温度范围称为“等热区”或“热中性区”。

气温下降时散热增加，必须提高代谢率增加产热才能维持体温不变，代谢率开始提高的环境温度称为“下限临界温度”。气温

上升时通过物理调节不足以维持体温恒定时，需要减少产热时的环境温度称为“上限临界温度”。两临界温度之间的气温范围即等热区，此温区内产热量等于散热量。其中代谢率最低、产热量最少的温度称为“等热温度”，约比体温低7～10℃。

体型较大的动物等热区较宽，下限临界温度较低，可在完全饥饿时测定。年龄、皮毛、饲养水平、生产力及适应性等都影响到临界温度的高低。幼畜的等热区较窄，临界温度较高；毛密脂厚的等热区宽，临界温度低；饲养水平高的临界温度低，同一种动物在寒带比在热带临界温度低，等热区宽。泌乳、产蛋、使役、妊娠时代谢率高，临界温度低。幼畜禽因身体的比表面积大容易散热，对环境温度的要求比成龄畜禽高。

临界温度及各温度区的范围如图2-4所示。

A—A′区　为舒适区，动物毫无冷热感觉，只需最小调温即能维持体温恒定。

A—B区　动物收缩血管或竖毛来增加热贮备。

A′—B′区　通过血管舒张、出汗、喘气来散热。

B—C区　需增加产热维持体温，到达C点后动物额外产热已不能补偿散热，体温开始下降。

B′—C′区　增加出汗、喘气或减少产热，直到C′点上述制冷机制已不能阻止体温上升，高体温又进一步增加代谢产热，从而形成恶性循环，直至到达D′点而死亡。

畜禽的致死高温仅比体温高出数摄氏度，致死低温却比体温要低20℃以上。但初生动物由于相对体表面积大，皮下脂肪少，被毛稀疏和代谢率低，体温易受外界影响。

畜禽通过皮毛、羽毛和脂肪隔热可减少体热的散失。大多数畜禽以被毛隔热作用为主，只有猪和鸭的脂肪隔热作用较为明显。畜禽还可通过肌肉活动、寒战或非寒战产热而获热，但需消耗体内能量；还能够以行为适应来御寒，遇冷拥挤成堆，放牧时背对风雪

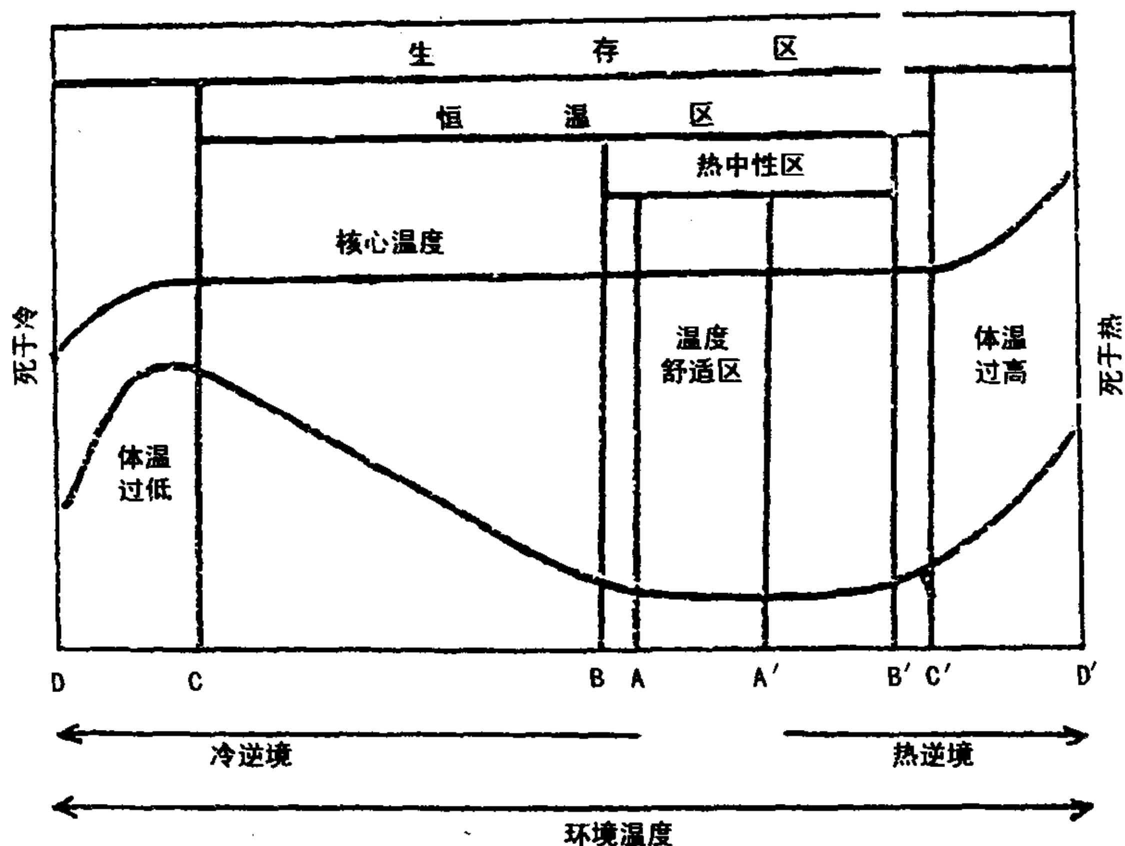


图 2-4 临界温度及各温度区的范围

B 为下限临界温度 B′为上限临界温度

B-B′为等热区 A-A′为舒适区 C 为冷害温度

C′为热害温度 C-C′为恒温区 D 为最低致死温度

D′为最高致死温度，D-D′为生存区

和寻找向阳处躲避，调整姿势和方位，有的动物还衔干草垒窝。春夏则脱毛换羽。

高温下的高湿对散热不利，低温下的高湿则因导热率加大也不利于保温。

原产热带干旱地区的动物如骆驼、驴、瘤牛、山羊等对炎热有较好的适应性，牦牛、黄牛、猪、兔和家禽较不耐热。原产寒带的动物体型较大，被毛保温性好，皮下脂肪厚，较为耐寒，如绵羊、马、兔和禽类。水牛个体虽大但被毛稀疏，皮下脂肪少，很不耐寒。

每种动物及品种在不同年龄段都有其最适生长温度，饲料利

用率最高。低温下饲料消耗增加，大量用于产热和保持体温。高温下散热困难，体温升高，食欲下降，肥育速度也减慢。但短期高温、低温或营养不良抑制生长，恢复到适宜环境温度或营养水平后，一定时期内具有代偿性加速生长的作用，采食量和饲料利用率都高于正常环境条件下。畜禽的适宜温度见表2－7。

表2－7 畜禽的适宜温度

畜禽	适温℃	畜禽	适温℃	畜禽	适温℃	畜禽	适温℃
母猪	15～20	初生羔羊	25～27	雏鸡	25～30	1周龄雏鸭	27～30
初生仔猪	27～32	哺乳羔羊	5～21	育成鸡	10～20	2周龄雏鸭	24～26
哺乳仔猪	20～24	母绵羊	7～24	产蛋鸡	10～24	3周龄雏鸭	20～24
肥　猪	15～17	马	5～20	肉用仔鸡	21～27	产蛋鸡	10
乳用犊牛	10～24	牦牛	8～10	火鸡	15～20	1～10日龄鹅	25～28
乳牛、肉牛	5～17	兔	15～25	鹌鹑	20～35	11～20日龄鹅	20～24

二、温度对农业生物发育的影响

（一）农业生物的感温性

感温性指生物长期适应环境温度的规律性变化，形成其生长发育对温度的感应特性。不同生物在不同发育阶级对温度的要求不同。大多数作物在一定范围内随温度升高生长发育速度加快。有些作物或品种感温性较强，在较高温度刺激下生长发育加快更加明显，如晚稻的感温性就强于中稻，更强于早稻。丁颖等对我国水稻品种进行感温性试验，提出了高温出穗促进率的概念，作为感温性的级别标准。

高温出穗促进率(％)＝[(高海拔地区出穗日数－同纬度低海拔地区出穗日数)/高海拔地区出穗日数]×100　　(2－18)

起源于高寒地区的植物在发育过程中需要一定低温刺激才能正常生长和发育，称为“春化现象”，是植物感温性的另一种表现。中国农业科学院曹广才等 80 年代对我国不同小麦品种感温性类型进行了系统研究。

(二)积温学说

温度对植物和变温动物生长发育的影响，包括温度强度和持续时间两个方面。1935 年法国 A. F. de Réaumur 提出作物从种植(P)到成熟(M)要求一定量的日平均温度($\bar{T}$)累积值(K)，即

$$\sum_{P}^{M}\bar{T} = K \quad (\text{当 } \bar{T} < 0 \text{ 时仍按 } 0 \text{ 累加}) \qquad (2-19)$$

1837 年 Boussinggault 用基本相同的方法计算谷物从播种到成熟所需热量，称此期间天数与日平均气温的乘积为“℃·日”(degree－day)。1976 年 Haberland 给出了大多数作物的积温指标，使积温学说开始广泛应用于农业生产。1923 年 F. C. Houghton 和 C. P. Yaglou 提出了有效温度的概念，开始了对作物有效温度、生物学零度和有效积温的研究。几十年来农业气象学家对积温的计算方法和应用以及积温的稳定性问题进行了深入和广泛的探讨。

积温学说可归纳为以下 3 点：①在其他条件满足的前提下，温度因子对生物发育起着主导作用。②生物开始发育要求一定的下限温度。③完成某一阶段的发育需要一定的积温。

积温有不同的表达形式。活动温度是高于生物学零度的日平均温度，活动积温 A_a 即生物在某段时期内活动温度的总和。有效温度是活动温度减去生物学零度后的差值，是活动温度的有效部分。有效积温 A_e 即生物在某段时期内有效温度的总和。

$$A_a = \sum_{i=1}^{n} T_i \quad (T_i > B, \text{当 } T_i \leqslant B \text{ 时 } T_i \text{ 以 } 0 \text{ 计}) \qquad (2-20)$$

$$A_e = \sum_{i=1}^{n}(T_i - B) = A_a - nB \qquad (2-21)$$

$$(T_i > B, \text{当 } T_i \leqslant B \text{ 时 } T_i - B \text{ 以 0 计})$$

式中 n 为该时段天数；Ti 为第 i 日平均气温；B 为该发育阶段的生物学零度。

英国的 J.L.Monteith 教授将式(2－21)表示为：

$$\frac{1}{t} = \frac{T - T_b}{\theta_1} \qquad (2-22)$$

式中 $1/t$ 为发育速率；T_b 为生物学零度；T 为 t 天的平均气温。可以看出积温 θ_1 的地位与时间(天数 t)相似，只是分子多了一个温度项($T - T_b$)。从物理学原理看，把积温看成热量指标是说不通的，主张称为"热时"(thermal time)，认为积温本质上应是经过温度订正的一种时间进程度量。同样还可以定义在最适温度以上和发育的最高温度 T_m 以下的"热时"概念：

$$\frac{1}{n} = \frac{T_m - T}{\theta_2} \qquad (2-23)$$

显然式(2－23)中温度越高有效性越低。θ_2 是超过最适温度条件下的有效积温或"热时"概念。最适温度 T_{op} 可由式(2－22)和式(2－23)联立求出：

$$T_{op} = \frac{T_b\theta_2 + T_m\theta_1}{\theta_2 + \theta_1} \qquad (2-24)$$

J.L.Monteith 关于积温实质的观点更容易被物理学家和生理学家所接受。为应用方便，目前我国仍广泛使用积温这一不够准确的概念。

变温动物生物发育也与积温有着明显关系，但恒温动物生长发育受环境温度的影响较小。

农业生物对积温的要求并不稳定，同一作物和品种在不同年份不同地区种植所要求的积温也有差别。原因在于其他因子对生

长发育也存在复杂的影响，温度对发育速度的影响也不完全是线性的，加上其他环境干扰因素、生物个体之间的差异，以及人为影响，都可导致应用积温推算生长发育进程产生误差。尽管如此，经适当改进和订正后，积温仍不失为一个简便有效的反映"热量"条件的农业气象指标。

（三）温度日变化对生物生长发育的影响

自然条件下气温呈周期性变化，许多生物适应温度的某种节律性变化，并通过遗传成为其生物学特性，这一现象称为"温周期现象"，以日温周期为最常见。如热带植物适应昼夜温度高、振幅小的日温周期，而温带植物适应昼温较高夜温较低、振幅大的日温周期。

昼夜变温对植物生长有明显的促进作用，F. W. Went 的试验表明，番茄生长与结实在昼夜变温（白天 26.5℃，夜间 7～19℃）下要比恒温（26.5℃）好得多。气温处于下限温度和最适温度之间时，日较差大通常是有利的，因白天适当的高温有利于增强光合作用，夜间适当的低温又有利于减弱呼吸消耗。但在靠近下限温度或上限温度时，容易出现危害温度，温度的日较差过大往往不利。日平均温度较低而日较差大时，夜间温度常接近或低于下限温度，作物生长很慢或不能生长，但白天温度高于下限温度仍能生长。因此，在高纬度、温差大的地区，早春可在相对低的平均温度下播种，以利用白天较高的温度促进发芽出苗。如华北玉米春播需在日平均气温通过 10℃以后，而东北通过 7℃就开始播种，可争取延长生育期和利用土壤返浆水分出苗。当日平均温度较高时，午后温度往往接近或超过上限温度，抑制作物生长，如冬小麦中午前后光合作用常出现"午睡现象"。温度越高，光合作用下降的时间越长。这时，早晨和夜间的温度对于作物的发芽和生长具有更重要的作用。因此，在较低温度下，日较差大利于发芽；而在较高温度下，日较差小有利于发芽。

温度日变化的影响还与高低温的配合有关。如北京冬小麦灌浆期间的气温日较差比拉萨大，但最高气温常超过小麦光合作用适温。而拉萨最高气温仍处于适温范围。如以15～24.9℃为小麦光合作用适宜温度范围，北京每天只有6.9 h，而拉萨有9.7 h，因此，拉萨的气温日变化有利于白天光合积累和夜间抑制呼吸消耗，加上其灌浆期长度几乎为北京的2倍，可获得很高的小麦粒重。但青藏高原又因灌浆期温度过低，小麦籽粒含蛋白质普遍偏低。

温度年变化对作物生长也有很大影响，高温对喜凉作物不利，喜温作物却必需一段相对高温期。由于大陆性季风气候的影响，中国温度的年变幅大于世界大部分同纬度地区，导致一年生喜温作物分布北界为世界纬度最高，越冬作物分布北界纬度却低于世界其他地区。

畜禽的体温也有一定的日变化，以清晨最低，下午最高，与体内的代谢强度有关。气温年变化对畜禽的生殖机能有明显的影响，大多数动物在温度适宜的春秋季节繁殖机能旺盛，高温对公畜生殖机能和身体活动有害。

(四)温度与光照对作物发育的综合影响

其他因子在一定程度上也能影响生物的发育进程，尤其是光照。

首先，光照条件影响作物对积温的需要量。高原上太阳辐射强，白天叶温比气温高3～5℃，群体内气温也比百叶箱要高，完成同一发育期所需积温要比低海拔地区少。

有些作物对光周期比较敏感，需要对积温公式进行光照订正。水稻、大豆等在短日照下发育加速。江苏的做法是，将长日照下的温度乘以一个小于1的光温系数进行订正。对于小麦、甜菜等长日性作物，有人用光温积衡量不同地区与季节的发育速率，比用积温更加稳定。

$$PTU = \sum_{i=D_p}^{D_m} (\bar{t} - B_t) d_1 \qquad (2-25)$$

式中　D_p 为播种期；D_m 为成熟期；$\bar{t}$ 为日平均气温；B_t 为下限温度，d_1 为日照长度(h)。

在中高纬度地区，一年中光照长度的高峰期要比温度高峰期提前，使得光温对作物发育的影响叠加后的效应变得十分复杂。刘汉中归纳出框图如图 2－5 所示。

作物	项　目	时　期	峰前期	峰间期	峰后期
长日性作物	型　号		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
	光温对发育期日数的影响	若时期延晚	－↓	＋↓	＋↑
		若时期提早	＋↑	－↑	－↓
	光温影响的相互关系		叠 加	抵 消	叠 加
	影响的大小		大	小	大
短日性作物	型　号		Ⅱ	Ⅰ	Ⅳ
	光温对发育期日数的影响	若时期延晚	＋↓	－↓	－↑
		若时期提早	－↑	＋↑	＋↓
	光温影响的相互关系		抵 消	叠 加	抵 消
	影响的大小		小	大	小

图 2－5　播期或发育期延迟或提早光温对发育的综合影响

＋、－表示光时的影响；↑、↓表示温度的影响；＋↑表示增加发育的日数，即起延缓作用；－↓表示减少发育日数，即起加速作用

图中时期延晚或提早可因播栽期调整、地区差异或年际变化或波动引起

根据以上原理，短日照作物如大豆在向高纬度、高海拔地区引种时常发生发育的“前延后促”现象，反向引种则发生“前促后延”

现象。长日照作物在引种时因光温的效应相互抵偿,延迟或促进作用都较小。在跨区域引种时必须了解当地与原产地纬度和气候的差异,合理引种能获得增产效果,引种不当则可能减产甚至颗粒无收。

(五)温度对农业动物发育的影响

畜禽的精子所需的环境温度以比体温低4～7℃为宜,哺乳动物可通过提肌与血管的作用调节阴囊温度。高温使家畜的受精率下降,妊娠期热害可导致流产和畸形。

变温动物发育进程与温度的关系与植物相似,使用积温指标可以很方便地推算。如鳟鱼卵孵化所需活动积温就稳定在410℃·d。粘虫各虫态发育的起始温度和有效积温如表2-8所示。

表2-8 粘虫各虫态发育的起始温度和有效积温

发育阶段	起始温度(℃)	≥10℃有效积温(℃·d)
卵	12.1±1.1	45.3
幼虫	7.7±1.3	402.1
蛹	12.6±0.5	121.0
成虫产卵	9.0±0.8	111.0
整个生活史	9.5±1.0	685.0

三、农业温度指标

(一)气温、土温、水温和农业生物的体温

温度对农业生物生长发育的影响最终体现在体温上。通常植物和变温动物的生长发育速度与体温成正相关,恒温动物虽能保持体温不变,但环境温度也将影响代谢速率和生命活动。

测定农业生物的体温很费事。农作物和树木的活跃生长期间气温的影响最为直接,又是最基本的气象观测项目,成为最主要的温度指标。但是在作物播种、出苗和移栽期间,以及研究温度对块

根、块茎、地中茎和根系生长发育的影响时,使用土温指标更能说明问题。春播和移栽常以5 cm土温,小麦越冬常以分蘖节所在的2或3 cm土温为指标。需要注意的是气象站观测的地温与农田实际土温不同,需要比较分析后才能应用。水生生物则以水温为指标,无土栽培的经济作物以营养液温为温度指标。某些特殊研究项目中还需测定生物的体温,牲畜通常测定肛温,作物最常用的是测定叶温,有时也需测定树干温度、生长点温度和果温等。

通常在太阳辐射下叶温要高出气温3～5℃,干旱时可高出10℃以上,阴天和遮蔽时与气温接近,夜间叶温通常低于气温。水分充足、蒸腾旺盛时叶温也常低于气温,从叶-气温差可以判断土壤水分的盈亏状况,土壤干旱、水分亏缺时叶-气温差小。刘瑞文等指出叶-气温差大,日照充足和水分满足时,叶面积平稳下降有利于灌浆。灌浆前期叶温低于地表温度及气温,蜡熟后期则高于气温。太阳高度角较高时直立叶片的叶温要低于水平叶片,遮阴时反之。气象站观测的是1.5 m高度的百叶箱气温,在作物苗期植株较矮时与体温差异较大,有时需要对植株所在高度的气温进行补充观测或直接观测叶温。

(二)农业界限温度

温度与农业生产有着密切关系,在分析气候对农业生产的影响时,除使用日平均气温和温度三基点等指标外,还经常使用界限温度的概念,它标志某些重要物候现象和农事活动的开始或结束。农业气象常用的界限温度及其农业意义是:

0℃:初冬土壤冻结,越冬作物停止生长。早春土壤开始解冻,越冬作物萌动,早春作物开始播种。早春日平均气温通过0℃到初冬通过0℃期间为“农耕期”,低于0℃为“休闲期”。

5℃:冻土基本化通,喜凉作物开始活跃生长,多数树木开始生长。深秋通过5℃日,越冬作物进行抗寒锻炼,土壤开始日消夜冻,多数树木落叶。

10℃:春季喜温作物开始播种与生长,喜凉作物开始迅速生长。秋季喜温谷物基本停止灌浆,其他喜温作物也停止生长,大于10℃期间为喜温作物的生长期,与无霜期大体吻合。

15℃:春季稳定通过15℃日,为水稻适宜移栽期和棉花开始生长期;秋季稳定通过15℃日,为冬小麦适宜播种期下限。大于15℃期间为喜温作物的活跃生长期。

20℃:春季通过20初日,为热带作物开始生长期,水稻分蘖迅速增长。秋季低于20℃对水稻抽穗开花不利,易形成冷害导致空壳。初终日之间为热带作物的生长期。

第三节 水分与农业生产

一、植物的水分状况

(一)水分与植物的生命活动

水是最重要的农业环境因素之一,农业生物的各种生命活动都离不开水。

首先,水是植物光合作用的基本原料。其次,矿质养分只有溶于水中才能被根系吸收和在植物体内循环,植物制造的有机养分只能以溶液形式在体内输送转移。第三,植物细胞依靠充满的水分来维持膨压支撑自身,细胞伸长也要依靠膨压来实现。植物还依靠水分蒸腾来降低叶温和提供根系吸收土壤水分、养分的动力。最后,植物的呼吸作用、有机物质合成和分解都要有水分子的参与。

外界水分缺乏时植物生命活动不能正常进行,干燥的空气或土壤甚至可从植物体中夺走水分,直到其死亡。外界水分过多时,许多植物因缺氧,根系不能正常吸收水分和养分。水分对农事作业也有很大影响。

(二)植物体的水分含量

水分是植物细胞原生质的主要成分,一般要占到70%～90%。植物的不同种类、不同器官及不同部位,处于不同的环境条件下,其水分含量有较大差别。通常生长旺盛的器官和组织的含水量高于老龄器官和组织,上部器官组织高于下部,分生组织和输导组织要高于表皮、皮层及其他组织。

植株含水量随环境条件不断变化。在一定范围内,环境水分状况越好,植物从周围吸收的水分越多,体内含水量也越高。温度、光照、风、湿度等环境因素也都对植物体的含水量有很大影响。

细胞内的水分以束缚水和自由水两种状态存在,前者被原生质胶体微粒吸附而受束缚不易流动,不能参与代谢活动,但与植物的抗性密切相关;后者可以自由流动,并参与各种代谢活动。

直接表示叶片水分状况的指标有叶片相对含水量和叶水势,还可用叶温来间接表示。

叶片相对含水量是取样叶片水分含量与具有充分膨压的叶片的水分含量之比,较易测定,又与土壤含水量成线性相关,对降水量和灌溉量的反应比土壤水分更敏感,因此被广泛使用。

$$RLWC = \frac{W_f - W_d}{W_s - W_d} \times 100\% \qquad (2-26)$$

式中　W_f 为样品叶鲜重;W_d 为样品叶烘干重;W_s 为具有充分膨压的叶片的鲜重。

(三)叶水势和土壤-植物-大气连续体

化学势指在一个相当大的系统中,在等温、等压下保持各组分浓度不变时,加入1 mol物质所引起的自由能的增量。水势定义为系统中水的化学势与同温同压下纯水化学势之差。

叶水势是以势能表示的叶片含水状况指标,单位为$J\cdot g^{-1}$,它综合了作物、品种、年龄、土壤水分状况与大气蒸发力对植物水分状况的影响,比土壤水分含量和降水量指标更能直接说明植物体

的水分状况。水势又是土壤有效水分与辐射、气温、相对温度、风速等气象因子的函数。其缺点是单叶水分状况具有明显的日变化,取样数量又限制了其代表性。它还随植物基因型、生育状况、发育阶段、生长地点及条件等改变,因而不够稳定。在相同的叶水势下,对应的叶片相对含水量并不一定相同,有时植物可通过降低渗透压来保持高的膨压势,具有较高的叶片相对含水量。

影响叶水势最重要的气象因子是空气饱和差,经饱和差订正后的叶水势在使用中比较稳定。

根据水势的概念,植物水、大气水、土壤水的能态,都可以用相对于根系的水势来衡量。水分被土壤中的根系吸收,通过细胞传输,进入茎部,再通过输导组织到达叶片,再由叶片表面的气孔扩散到边界气层,最后参与大气的乱流交换。这样一个过程形成的统一和动态的连续体称为“土壤 - 植物 - 大气连续体”(soil - plant - atmosphere continuum),简称 SPAC。SPAC 各部分的水势大小见表 2 - 9。

表 2 - 9 SPAC 各部分的水势(MPa)

部位	土壤近根部	根部木质部(近地表)	叶肉细胞的液泡(地上 10 cm)	气孔中的空气(95%湿度)	气孔外空气(65%湿度)
水势	-0.5	-0.6	-0.8	-6.9	-70

较为系统完整的 SPAC 概念是 1966 年由 Philip 提出的,他认为三者尽管介质不同,界面不一,但在物理上都是统一的连续体。水在该系统中的流动互相衔接,可应用统一的能量指标“水势”来定量研究并计算水分通量。

严格地说,SPAC 中的水流是非稳定流,但实际上只要作物没有发生萎蔫,就可以假定成连续的稳定流,水流通量可用 Van den Honert 模式来模拟:

$$q = \frac{\Psi_s - \Psi_r}{R_{sr}} = \frac{\Psi_r - \Psi_L}{R_{rL}} = \frac{\Psi_L - \Psi_a}{R_{La}} \qquad (2-27)$$

式中　Ψ_s、Ψ_r、Ψ_L、Ψ_a 分别是土壤水势、根水势、叶水势和大气水势；R_{sr}、R_{rL}、R_{La}分别是土壤到根表皮、根部通过木质部到叶气孔腔、气孔蒸腾扩散到周围空气等3段路径的水流阻抗。气孔蒸腾阻力构成了植株吸收和蒸腾耦合过程中的主要阻力，通过调节气孔开度可控制通过SPAC系统的水流。

Van den Honert 虽然提供了模拟SPAC水流的实用模式，但将实际情况过于简化了，估算出来的叶－气系统水流阻力量级与实际情况有较大差异，还需要加以改进。康绍忠等提出水容因素的存在阻止了欧姆定律模拟的严格应用，因为通过较大植株不同部分的水流常常以不同速度运行。例如白天蒸腾迅速增加时，根系吸收水分滞后于蒸腾，叶片和茎的含水量将下降。他提出的SPAC水流阻容网络模式取得了更好的模拟效果，由于篇幅所限，不在此详述，读者可参阅有关文献。

(四)降水及截留对作物的影响

降水是作物水分供应和土壤水分的主要来源和农田水分平衡的主要收入项。“透雨”指一次降水使土壤增墒后，作物能在较长时期维持正常生长。前期土壤越干旱，降水强度越大，径流损失越大，下透雨所需雨量也越大；但雨量太小时蒸发损失很大。过多的降雨会形成湿害或涝害。

降水时间对作物生长发育也有很大的影响，在作物吸收水分能力弱和需水量最大的时期降水效果最好。连阴雨会使光合作用削弱，还可诱发病害。夜雨日晴有利增产和提高品质。闪电还能使大气中的氮素以硝酸根离子形式给土壤施肥。降水有一定的滞后效应，北方有“麦收隔年墒”之说。

降水有时可对作物产生直接伤害，谷物灌浆后期常因雨造成掉粒。用塑料薄膜在田间进行遮雨试验，尽管降雨区光照强度比

遮雨区大10%，多种作物的干物质增长速率还是要比遮雨区下降30%～50%。原因在于雨水覆盖叶面使气孔关闭，影响CO_2交换，削弱了光合作用，雨水还溶失了部分光合产物。但降雨区叶片扩展快于遮雨区，这与植物组织内含水量增加有关。

植物茎叶截留的降水能被植物吸收，但很快蒸发，有效性较小。截留比例与雨量、雨强有关，降雨初期和雨量很小时截留比例较大。通常农作物截留量仅为降水量的5%，森林可高达20%～30%，日降雨量5 mm以下的小雨有1/2甚至全部被截留。

(五)空气湿度对作物生产的影响

空气相对湿度直接影响植物的蒸腾速率，在土壤水分充足和植物具有一定保水能力的情况下，空气干旱时叶面蒸腾旺盛，根系吸收水分和养分增多，可加速生长。空气湿度饱和时生长速度下降，灌浆期过湿还会延迟成熟，降低产量和品质，且不利于贮藏。但土壤水分不足时空气干旱会破坏水分平衡，影响植物生长。但也有一些植物在空气饱和差加大时蒸腾立即下降，反而能引起叶片含水量的增加。

空气湿度对植物的开花授粉有很大影响，如板栗在相对湿度小于22%时，未成熟花粉会因花药变干而提前散落，使结实率下降。空气湿度还对各种病虫害的发生、发展有很大影响，多数真菌类病害在湿度大时侵染发病快，而病毒类病害在湿度低时易侵染发病。

露水在一些干旱地区可被植物直接吸收，是植物生存的主要水分来源，如地中海东岸和墨西哥西岸。但露水也是某些病害侵染的必要条件。结露还有利于减轻植物的低温危害。

二、农田土壤水分

(一)土壤水分的类型

水分在土壤中对应不同力所作用的水分状态，可分为吸湿水、

毛管水和重力水3类。

(1)吸湿水　又称吸着水或紧束缚水，指烘干土壤从含有饱和水汽的空气中吸附于土粒表面的水分。达到最大吸湿量后不再释放热量。当空气湿度达到饱和状态时可达最大吸湿量或吸湿系数。土壤质地越细，最大吸湿量越大(表2－10)。

表2－10　土壤质地与最大吸湿量(%)的关系

土壤质地	细砂	壤质砂土	砂壤土	轻壤土	中壤土	粘土	重粘土	泥炭土
吸湿系数	0.034	1.060	1.400	2.090	3.00	5.40	6.54	18.42

吸湿水被牢牢吸附在土粒表面，厚度极小，密度大于普通水，最大可达1.4～1.5。热容量也低，仅为2.1～3.3 $J \cdot cm^{-3}$。没有溶解养分的能力，不能自由移动，对于植物基本上是无效水。

(2)毛管水　由毛管弯曲凹面的表面张力保持，以水膜形式吸附于土粒周围的水分，又分薄膜水和毛管水2类。薄膜水又称膜状水、松吸着水或松束缚水，为吸着在土粒表面呈薄膜状的水层。薄膜水达最大量时的土壤含水量称最大分子持水量。其性质已与液态水相近，但受土粒吸持排列较紧，密度仍大于1，冰点在－15℃以下，具有较高的粘滞性而无溶解性。能以湿润方式从水膜厚的土粒向水膜薄的土粒缓慢移动。土壤质地越细，有机质含量越高，薄膜水含量就越高。土壤溶液浓度越大，渗透压越高，薄膜水含量越低，在盐碱土中几乎没有薄膜水的存在。

狭义的毛管水指土粒孔隙之间的毛管悬着水分，其性质和运动取决于毛管力，即毛管壁与水分子间的吸着与毛管水弯曲面表面张力的合力。毛管力的大小与直径有关，孔隙大于8 mm无毛管力作用，0.1～8 mm间毛管作用逐渐显示，0.001～0.1 mm范围毛管作用最明显，小于0.001 mm时空隙为薄膜水所填充。毛

管水更多具有自由水的性质,容易移动,易溶解各种养分,易被植物吸收利用。在地下水位较高时还能使深层水分上升到表层,是植物最为有效的土壤水分类型。

(3)重力水 当土壤水分含量超过土粒吸着力和毛管力作用范围后,多余的水分会在重力作用下沿土壤非毛管孔隙下渗,不能在土层中保持,只在大雨或灌溉后或受涝后暂时出现。虽能被植物吸收利用,但出现时土壤水分一般已经过多,实际上非但无效,而且还常造成缺氧和养分的淋失。

(二)土壤贮水量(%)的计算

$$W = h\rho B\% \times 10 = 0.1 h\rho B \qquad (2-28)$$

或

$$W = 0.1 h B_v\% \qquad (2-29)$$

式中 h 为土壤厚度;ρ 为土壤容重;$B\%$ 为土壤重量含水量;B_v 为土壤容积水量。土壤有效贮水量为:

$$W' = 0.1h\rho(B - Kn) \qquad (2-30)$$

式中 Kn 为凋萎系数。

表 2-11 华北平原不同质地土壤的水分常数

土壤质地	重量百分比(%)				体积百分比(%)			
	最大吸湿量	凋萎系数	田间持水量	全持水量	最大吸湿量	凋萎系数	田间持水量	全持水量
砂壤土	1~2	4~6	22~30	30~40	2~3	5~9	32~42	45~52
轻壤土	1~2	4~9	22~29	28~40	2~3	6~12	30~36	40~52
中壤土	2~3	6~10	22~28	30~38	3~5	8~15	30~35	44~54
重壤土	2~3	6~13	22~28	28~38	3~4	9~18	32~42	40~50
轻粘土	—	15.0	28~32	32~40	—	20.0	40~45	45~54
中粘土	—	12~17	25~35	35~40	—	17~24	35~45	48~53
重粘土	—	—	30~35	38~42	—	—	40~50	48~55

石培华等的观测表明土壤相对含水率与叶－气温差有良好的相关性。

$$\frac{SW}{FC} = 0.777 - 0.17\ ln(\Delta T_c + 3) \qquad (2-31)$$

$$(n = 30, \quad r = 0.93, \quad P = 0.01)$$

对于孕穗到灌浆期式(2－31)可简化为

$$\frac{SW}{FC} = 0.620 - 0.049\ \Delta T_c \qquad (2-32)$$

$$(n = 12, \quad r = 0.82, \quad P = 0.01)$$

式中　SW 为土壤含水量；FC 为田间持水量；ΔT_c 为距冠层 20 cm 高用于红外测温仪测得的辐射温度与 1m 高处气温的差值。当 $\Delta T_c \geqslant 1℃$ 时开始出现水分亏缺，$\geqslant 2℃$ 时亏缺明显，$\geqslant 3℃$ 时亏缺严重。

(三)土壤水分平衡

把农田土壤系统看作黑箱，土壤水分平衡可用下式表示：

$$W_1 + (R_w + m_w + n_w) - (j_1 + I_1 + E + T) = W_2 \qquad (2-33)$$

式中　W_1 和 W_2 分别是某时期开始和结束的土壤水分含量。收入量包括 3 项：R_w 为降水量，m_w 为毛管上升水，n_w 为水汽凝结量，以降水为主，灌溉地上还应加上灌溉水量。支出量包括 4 项：j_1 为地面径流量；I_1 为渗漏水量；E 为土面蒸发量；T 为植被蒸腾量，以蒸发和蒸腾为主，合称蒸散。有植被条件下土壤蒸发量约为总蒸散量的 1/10。植物吸收的水分约 4/5 多用于蒸腾，其余用于其他生理活动。

毛管上升水只有在地下水位较高和土壤足够湿润时才有意义。水汽凝结量只有在大陆性强的气候条件下和土壤透气性好、毛管作用小时才有明显作用。

地面径流与降水量及其强度、土壤透水性、地形、植被等有关。在渗入达高峰后开始产生径流，并逐渐加大。降水停止后径流仍

能保持一段时间。径流过大会引起土壤冲刷。土面粗糙有起伏，植被覆盖严密都可削弱径流，减少土壤及养分流失。

(四)水分在土壤中的运动

水分渗入土壤的速率取决于以下因素：

(1)时间　渗入速率开始与降水或灌溉强度相等，以后渐慢，最后稳定在一定流速，称“最终入渗速率”。

(2)土壤初始含水量　量大可较快达到最终入渗速率。

(3)土壤导水率　随土壤湿度加大而变大，土壤饱和时导水率最高。导水率还与土壤结构、质地、孔隙度、气泡、溶质等有关。

(4)土壤表面状况　植被覆盖截留雨水并削弱对土面的溅击，有利于防止土面结皮，因此初期入渗快，但最终入渗速率相同。

水分渗入土壤是吸力梯度与重力梯度作用的结果。

自由水在土壤表面流动，进入湿润土壤的速率取决于剖面孔隙分布和土温。孔隙越小移动越慢，土温越高移动越快。水分先在某些孔隙中流动，但如开始时土壤相当干燥，湿润锋可相当均匀一致地通过土层。但当土壤湿润后大部土层将没有水分渗漏。

任何干燥土壤在开始时渗透速率都是很高的，水分以明显的湿润锋向下移动，干湿界线可保持几天。随时间推移由于基模吸力降低，渗透速率下降。干燥土壤遇水后水分首先满足较强的基模吸力，进行不饱和流动。当水分增加到一定量，在重力作用下经粗孔隙向下渗透，进行饱和流动。

入渗结束后水分还可在重力、吸力梯度和温度作用下继续向较干的下层移动，称为土壤水分再分布过程。上、下土层水分差异越大，吸力梯度越大，再分布速率越快，只受重力影响的下渗速率就越慢。随时间推移，原干土层湿润后吸力梯度减小，原湿润层变干后导水率也下降，湿润锋变得模糊消散(图 2-6)。

(五)土壤水分的调控途径

(1)集水技术　干旱缺水地区用不透水物质覆盖地面汇集降

水，使大范围雨水集中到小面积基本农田上使用。以色列应用此项技术建设起发达的沙漠农业，目前在我国西北地区也正在迅速推广。

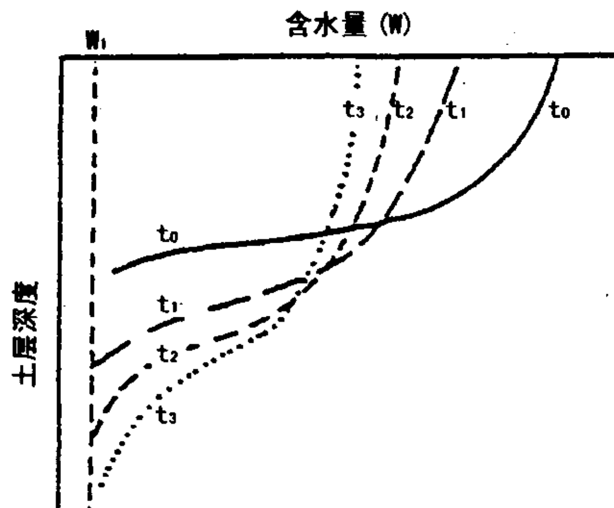


图 2-6　灌溉终止后再分布期间土壤水分的剖面变化（$t_i=0,1,2,3$，分别为灌水后当天、次日、第 4 天和第 14 天的水分垂直分布曲线）

(2)蓄水技术　对于季风气候下的半干旱和半湿润地区，蓄水保墒是旱地雨养农业的关键技术。蓄水技术包括夏末秋初深耕以接纳雨水，实行沟播聚集降水，坡改梯田等高种植以减少流失等。

(3)保墒技术　主要是减少土面蒸发，如通过少耕或免耕改良土壤结构和减少表层水分蒸发，冬春耙耱和春季深松土切断表层毛细管以减少下层水分蒸发，生长季覆盖地膜、秸秆或喷洒抑制蒸发剂，土表喷洒反光物质以降低地温，增施有机肥也可提高土壤的保蓄水分能力。风障也可削弱风速减少蒸发。

(4)灌溉技术　灌溉是补充土壤水分的基本手段。同量的灌溉，在土地平整、水量稳定时增墒效果较好。如地不平又大水漫灌，容易形成径流损失。采用喷灌、滴灌、渗灌等方式土壤表面不板结，蒸发损失少。一次灌水量过大易产生径流损失，但水量太小不易补充到深层。灌溉效率还与天气有关。

(5)调节土壤水分的生物措施　植树种草恢复植被是控制水土流失的基本途径，适当缩小行距可减少土壤水分的蒸发损失。营造农田防护林可改良局部地区小气候。

三、作物的需水规律

(一)蒸发、蒸腾和蒸散

1.蒸发

土壤水分蒸发是裸地土壤水分的主要支出项。土面蒸发包括土壤水的汽化和水汽向大气的扩散两个步骤,前者需要足够的热量,主要来自太阳辐射;后者要求土面水汽压高于近地气层的水汽压,并取决于土壤水分补给速度。随土壤由湿变干蒸发速率的变化分为3个阶段:

(1)稳高阶段 此阶段土表水量处在田间持水量到毛管断裂水量之间,土壤水分补给迅速充分,能经常维持土壤空气湿度的饱和,土面蒸发速率高且保持不变,其值与水面蒸发相同,取决于太阳辐射、空气温度、空气湿度、风等气象因子。

(2)速降阶段 土壤表层水量大致在毛管断裂水量到凋萎系数之间,土壤水分向土表移动的速度控制着蒸发速率。随土壤水分减少和移动速度减慢,土面蒸发速率迅速下降。主要取决于土壤水分传导速率,气象条件也有一定影响。

(3)稳低阶段 土面水量在凋萎系数以下,土壤水的液态移动几乎停止,蒸发面水汽压下降比土壤水的下降更快,很快形成表土干土层,水汽扩散速度很慢,蒸发速率极低,没有明显变化。但当土壤发生龟裂时,由于土壤表面积增大2.9～4.6倍,蒸发可加大2～3倍。

2.蒸腾

蒸腾是植物失水的主要方式。空气在接近植物表面时由于粘滞力产生很薄的“静止气层”,之上还有过渡层和乱流层。叶面蒸发水汽主要靠扩散。植物蒸腾的水汽扩散还要受气孔阻抗的影响:

$$T = \frac{C'(e's + e'a)}{r_a + r_s} \qquad (2-34)$$

式中　C'为常数，$e's$ 和 $e'a$ 为蒸发面与空气的水汽压；r_a 为空气阻抗；r_s 为气孔阻抗($s\cdot cm^{-1}$)。蒸腾消耗水分常用蒸腾系数，即植物形成单位重量干物质所消耗的水量来表示：

$$K_t = T_u/Y \qquad (2-35)$$

式中　K_t 为蒸腾系数；T_u 为单位面积土地上植物蒸腾总量；Y 为植物干物重。不同植物的蒸腾系数见表 2－12。

表 2－12　几种作物的蒸腾系数

作 物	高粱	玉米	小麦	燕麦	水稻	马铃薯	油菜	西瓜
蒸腾系数	322	368	543	593	710	636	743	600
作 物	黄瓜	菜豆	豌豆	蚕豆	向日葵	马齿苋	苍耳	白藜
蒸腾系数	713	682	778	794	705	292	432	801

蒸腾系数值随气象、土壤和栽培条件而变化，湿润气候下的蒸腾系数通常要小于干旱气候下的蒸腾系数。

蒸腾通过气孔来实现，影响蒸腾作用的因子包括气象因素、土壤水分和植物状况。

(1)叶面积　叶面积大蒸腾量也大，但并不成正比。叶片小可增加空气流动，使单位叶面的蒸腾量加大。根冠比大也有利于单位叶面获得更多水分。叶片相互遮阴和卷曲可减少暴露面积，也使单位叶面的蒸腾减少。

(2)根系状况　根系发育好根冠比大，单位叶面的蒸腾更旺盛，干旱时的差别更加明显。作物移栽时根系受伤使根冠比暂时失调，容易出现萎蔫。树木常通过落叶来补偿根部的损伤。

(3)叶片方位　垂直于阳光能接收更多辐射，蒸腾相应加大。

大多数植物叶片具有向光性，但干热地区植物叶片趋向与阳光平行以降低辐射强度。针叶树的叶片相互遮阴，以减少辐射和蒸腾。

(4)叶片大小和形状　其不同使空气阻抗改变而影响蒸腾。小叶片边界层薄有利于热交换，通过降低水势而减少蒸腾，但因边界层阻抗变小更易失水。大多数沙漠植物的叶片较小，叶温接近气温，使蒸腾减少。发生降雨时蒸腾使叶温下降，小叶植物的光合作用效率要高于叶片大的植物。

(5)叶片表面特征　许多植物器官表面覆有防水的蜡质或角质层，若除去蜡质，蒸腾可加大好几倍。有的植物表面还有白毛，能反射阳光，降低叶温而减少蒸腾。

(6)气孔　影响气孔运动的因子有光、CO_2、空气温度和湿度。植物通过调节气孔的开度，尽可能提高光合效率和降低蒸腾率，控制水分损失。

3.蒸散

土壤蒸发与植物蒸腾的总和称为“蒸散”。农田中出苗以前只有土壤蒸发，出苗后仍以蒸发为主。随作物长大，叶面扩展，蒸腾量不断增加，到植被覆盖地面较密时以蒸腾为主。土壤蒸发对植物的生命活动无直接影响，在缺水时应尽可能减少土壤蒸发对水的浪费。

(二)作物的需水量

作物在适宜的土壤水分和肥力水平下，经正常生长发育而获得高产的植株蒸腾与土壤蒸发的总和(植株体含水量很小，可忽略)，通常以某时段或生育期消耗水量深度 mm 或单位面积的需水量 m^3/hm^2 为单位。影响作物需水量的因素有气象、植物和土地等 3 个方面。

(1)气象因素　是主要影响因素，还直接影响植物生长发育。太阳辐射为水分蒸发提供能量，还通过对空气、植物和土壤的加热间接影响蒸散速率。阳光促使气孔开放，减少叶内阻力而加快蒸

腾。空气湿度接近饱和时蒸散将受到抑制，水汽压的垂直梯度越大，蒸散量也越大。空气流动可降低蒸发面上的空气湿度，并使蒸发面与大气之间形成气压梯度而影响蒸发量和速率。

(2)植物因素　株高、形态、根系状况、群体密度等都对光、温、湿、风等小气候要素产生影响，从而对蒸散速率产生影响。叶片大而湿润有利于保持与大气间的水汽压梯度，促进植物体内水分运动。吸收太阳辐射使叶片增温后，叶内水汽压增大。强壮的根系可吸收深层土壤水分，但当土壤吸水力很大或太阳辐射过强时，根系吸收水分不能满足植物蒸腾所需，可能出现暂时萎蔫。

(3)土地因素　小块湿地被大片干地包围时，由于水汽压梯度增大和温度升高，蒸散量要比湿润气候下同面积的湿地更大。裸露土壤增温快，风速也较大，比同样气象条件下有植被的土壤蒸发更大。

作物需水量有多种计算方法，农业气象学上常用的作物系数法首先计算参考作物的蒸散量，再利用作物系数修正得出具体作物的需水量。

$$ET_{ci} = K_{ci} \cdot ET_{oi} \qquad (2-36)$$

式中　ET_{ci}为计算时段内的作物需水量；ET_{oi}为计算时段内参考作物的蒸散量，即高度一致，生长旺盛，完全覆盖地面的绿色草地(高 8～15 cm)的蒸散量；K_{ci}为相应时段的作物系数，即某阶段作物需水量与相应阶段参考作物蒸散量的比，一般通过田间实测需水量与根据气象条件计算出的参考作物的蒸散量求得，反映作物本身的生物学特性、产量水平、土壤耕作条件等对作物需水量的影响。

作物系数在全生育期的变化与作物种类、品种、生育期及生长状况有关，对于同一作物、同一品种，K_{ci}与叶面积系数有密切的线性相关。

作物需水量测定应按照国家水利水电行业标准《灌溉试验规

范》SL13－90 中的操作规程进行。

陈玉民等计算了我国主要作物的需水量分布图，现将其主产区的数值列表如表 2－13。

表 2－13 主要作物在各主产区的需水量

作物	产区	需水量	作物	产区	需水量	作物	产区	需水量
冬	黄淮海	400～525	春	东北	100～550	棉	黄淮海	500～650
小	江淮陕南	325～400	小	内蒙古	400～600	花	新疆	500～1000
麦	新疆北部	350～650	麦	甘肃	150～600			
	新疆南部	500～1000		青海	100～650			
玉	黄淮海 *	350～400	双	浙江	400～550	双	闽粤	400～600
米	东北	400～550	季	江南	350～400	季	江南	350～500
	内蒙古	400～650	早	湘桂黔	250～400	晚	湘桂黔	300～400
	甘肃	400～700	稻	华南	400～700	稻	鄂西	300～350
	新疆	300～700						

* 为夏玉米产区。

(三)作物的需水临界期

这一时期为对水分最敏感，即水分缺乏或过多对产量影响最大的时期。作物的水分关键期，与水分临界期可能一致，也可能不一致。如我国北方旱地玉米往往春播期间的降水对于出苗率和产量有极大影响，可以认为是一个水分关键期，但这时作物需水量并不大，敏感程度也不如开花期，并不是需水临界期。作物水分关键期概念综合考虑了作物的特性和当地的农业气象条件，在生产上更为实用。

作物的需水临界期大多与生殖器官分化和形成相联系，表 2－14给出了主要作物的水分临界期。

要弄清作物不同时期的需水规律，应该搞清楚当地降水与土壤水分的季节变化。

表 2-14　几种主要作物的水分临界期

作物	临界期	作物	临界期
冬小麦	孕穗到抽穗	大豆	开花
春小麦	孕穗到抽穗	花生	花盘形成到开花
水稻	孕穗到开花(花粉母细胞形成)	马铃薯	开花到块茎形成
玉米	大喇叭期到抽穗	油菜	抽薹到花期终止
高粱、谷子	孕穗到灌浆	番茄	结实到果实成熟
棉花	开花到成铃	瓜类	开花到成熟

(1)播种期　北方春播期间“春雨贵如油”,土壤水分及降水是保证出苗的关键。但春雨过多特别是春雪引起地温下降,对出苗和苗期生长不利。盐碱地下小雨可加重返碱对出苗不利。播种期水分过大对出苗也不利,我国东北的三江平原就经常因为早春融雪形成春涝而影响适时播种。

(2)苗期　北方处于春旱期,但作物需水量不大,多数作物适当“蹲苗”可促进根系发育和基部茎节粗壮,有利于后期抗逆和高产。华北有“有钱难买五月旱,六月连阴吃饱饭”之说。但南方春季多雨,如与低温结合常造成烂秧,需要排涝。

(3)花器形成与开花灌浆期　需水量最大,大多数作物的水分临界期处于这一时期。但下雨对许多作物的开花也会产生不利影响,如淋洗花粉,导致落花、落荚、落铃和秕粒,连阴雨的危害更大。

(4)成熟收获期　需水很少。过多的降水常造成倒伏、发芽和霉烂。

农业气象工作中经常对分段气象条件与产量的关系进行分析,以确定哪些时段的降水对产量的影响最大。郑大玮运用积分回归方法分析逐旬降水对小麦和玉米产量的影响,结果表明:深秋和初冬降水易促使徒长,对山西小麦有负效应,常年干旱的后冬和春季降水则有明显的正效应。对于辽宁的春玉米,播种出苗期需要有适量降水,“拔节”前需要适度蹲苗以降水偏少为好,“拔节”后

到抽雄若降水充足可避免"卡脖旱",有利增产,灌浆期湿润降水有一定负效应。

在评定降水的有效性时,要注意其后效。我国北方干湿季分明,雨季的降水可渗入土壤贮存,供次年使用。华北有"麦收隔年墒"和"三伏有雨好种麦"的农谚。对于蓄水能力强的土壤,只要上年伏雨充足底墒好,即使春旱,小麦也能获得好收成。

(四)作物的实际耗水量

指作物在任何土壤水分条件下实际消耗的植株蒸腾、土壤蒸发与植物体含水量之和。而作物需水量指在特定的适宜条件下的作物耗水量。

作物的实际耗水量在干旱和低产条件下可能少于作物需水量,但在灌溉条件下大多超过作物需水量。旱田根层以下的深层渗漏一般不能被作物利用,还造成养分的流失。但土质粘重、地下水位又高的水稻田需要有适度的深层渗漏,否则会造成氧气不足,产生硫化氢、氧化亚铁等有毒还原物质,影响水稻的生长发育。但渗漏过多则造成水分和养分的损失。

田间无效耗水的另一种方式是地面径流。降雨量过大,雨势过猛,或大水漫灌,地面又不平整时,最容易形成径流损失。地面不平还造成高处浇不上水仍然干旱,低处积水成涝。

灌区输水过程中的损失也是相当惊人的,据各地较大灌区的调查测试,输配水过程中渠系渗漏损失占 25%～40%,水面蒸发损失占 5%,无效弃水占 10%～20%,渠系有效利用系数仅 0.4～0.6。

我国是水资源不足且时空分布极不均匀的国家,北方尤为紧缺。但另一方面农田灌溉中的浪费又很大,作物水分利用率远低于发达国家,农业节水增产的潜力很大。除上述无效消耗外,土壤蒸发对于作物的生理活动基本无效,应尽可能减少,特别是在苗期。植物蒸腾也有一部分是所谓"嗜好蒸腾量",并非作物生长所

必需，而是长期充分供水造成的，也是可以节约的。

(五)提高作物水分利用率(*WUE*)的途径

作物产量与水分投入量间的数量关系称为“水分生产函数”。在水资源不足和产量水平低下时产量与全生育期的蒸散量可用直线关系表示：

$$Y = a + b \cdot ET \qquad (2-37)$$

式中　a，b 为经验系数；ET 为蒸散量。

随水源条件改善和管理水平提高，Y 与 ET 的关系成为曲线关系，出现一个明显的界限。小于此界限值时 Y 随 ET 增加，开始时随着水分的投入增产幅度增大，以后增产效应下降，超过这一界限不再增产，反而随 ET 增大而减产。可用二次曲线表示：

$$Y = a + b \cdot ET + c \cdot ET^2 \qquad (2-38)$$

式中　a，b，c 为经验系数，由实测资料回归分析确定。

作物水分利用率(water use efficiency)定义为用于单位水分 Tp 所产生的干物质 DM：

$$WUE = DM/T_p \qquad (2-39)$$

60 年代就已用叶片光合作用与蒸腾速率之比计算叶片最佳水分利用率，70 年代已用于计算单位蒸腾耗水形成的干物质重量。单叶水分利用率为：

$$WUE = \frac{Pn}{T_p} = \frac{r_a + r_1 + r_b}{r_a' + r_1 + r_m' + r_b'} \qquad (2-40)$$

式中 $Tp = (\Delta e\ \Delta c)/(r_a + r_1 + r_b)$，为蒸腾速率；$Pn = (\Delta e \Delta c)/(r_a' + r_1' + r_m' + r_b')$ 为光合速率；Δe 和 Δc 分别是叶肉细胞与大气的水汽压梯度和 CO_2 浓度梯度；r_a，r_1，r_b 分别是水汽扩散的大气湍流阻力、叶阻力和边界层阻力；r_a'，r_1' 和 r_b' 则分别是 CO_2 扩散的大气湍流阻力、叶阻力和边界层阻抗、r_m' 是细胞间隔和叶肉的 CO_2 扩散阻力。

大田作物的水分利用率还需考虑群体及株间蒸发，定义为：

$$WUE = DM/ET$$

或
$$WUE = Ye/ET \tag{2-41}$$

式中 DM 为地上部干重；$ET = E + T$，为蒸散量，其中 E 为株间蒸发，T 为群体蒸腾；Ye 为籽粒产量。80 年代 George 建议改进上式，引进水分平衡各项，综合考虑各种水分消耗的利用率：

$$WUE = \frac{Ye}{T\{1 + [(E + R + D + L)/T]\}} = \frac{Ye}{T + E + R + D + L} \tag{2-42}$$

式中 R 为径流；D 为渗漏；L 为植被对降水的截留量。

影响 WUE 的因素包括植物特性和环境两方面。通常 C_4 植物的叶肉阻力低，WUE 较高；C_3 植物反之。经济系数也有很大影响。环境因子中光、温、水等气象因素起主要作用，蒸散量本身与 WUE 成反比，适度的干旱使气孔关闭影响叶水势，可增大 WUE；但持续干旱将影响正常生长发育，导致 WUE 下降。

WUE 的高低是植物特性、环境因素和管理水平相互作用的结果，提高 WUE 必须按作物特性和人类的需要定向选用和培育品种，并对土壤和水进行科学管理。

实行充分供水谋求最高产量，无论从产投比还是水肥利用率看，都并不是最经济的。土壤水分从田间持水量到萎蔫系数之间对作物基本上是等效的，实行不充分灌溉，仅在需水关键期浇水，单产下降不多，却往往取得最高的灌溉水分生产率。

四、农业动物与水分

(一)水分与动物的生命活动

水是动物体内含量最多的物质，构成体重 2/3 以上，水生动物体中比例更大，如水母占到 95%，鱼类 80%～85%，鸟类一般占

70%，哺乳动物占75%。幼龄动物体内水分比例大于成龄或老龄动物。高等动物如长期缺乏食物，可失去1/2的蛋白质、全部脂肪和糖，体重下降40%，但仍能生存；如失水10%，生命活动就会严重失调，失水20%就可致死。

水在动物体内主要以体液形式存在，可溶解无机盐和有机物，动物的消化、吸收、循环、呼吸、排泄、神经调节等生命活动都必须在水的参与下进行，养分输送、血液和淋巴等体液的流动都要以水为溶剂。水还具有润滑食物、保护器官、保持体温的作用。

降水对动物生存环境有一定影响，如淹没和冲刷巢穴，改变栖息地或繁殖地生境等。大雨淹没基地或天敌增加，蝗虫数量通常会下降。空气湿度对动物的生长发育和繁殖都有很大的影响，特别是昆虫。

动物获得水分有多种方式：

(1)从体表直接获得水分　无脊椎动物和两栖动物的皮肤能从湿润空气中获得水分。

(2)从饮水和食物中获得水分　这是大多数动物的主要获水方式。

(3)从生物氧化作用中获得水分　这类水分称为代谢水，是一些鸟类和昆虫重要的水分来源。

动物对水分条件具有一定的适应能力。

(1)行为适应　无脊椎动物靠迁移，沙漠动物大多昼伏夜出，蜂、蚁和鸟类有筑巢避水的习性。

(2)构造适应　陆生昆虫具有不透水的角质层；两栖类动物分泌体液保持体表湿润。爬行类动物依靠厚的角质层，鸟类依靠羽毛，哺乳动物依靠体毛来防止水分的过多蒸发。沙漠动物还具有特殊的生理适应能力，能将尿液和血液浓缩，保持较高的皮温。

(二)畜禽的水分平衡

水分对于畜禽的主要作用是维持体热平衡。炎热环境中饮水

可吸收部分热量,气温升高时需水量增加主要用于蒸发。但冬季饮冷水也能丧失部分热量并增加饲料消耗。畜禽通过尿液、粪便、皮肤及呼吸道等途径排出水分,产蛋、产乳和分泌唾液也排出不少水分。通常粪便含水量的变化较小,尿液含水量随饮水量、气候和饲料不同而差别很大。皮肤和呼吸道蒸发受气候影响很大。

动物缺水首先表现为饲料消耗和生产力下降,长时期持续缺水才会危及生命。

原产干旱地区的骆驼、山羊、绵羊和驴都较耐渴,牛、猪、鸡等较不耐渴。处于生长迅速的育肥期、泌乳期和产蛋期,以及使役畜等相对不耐渴。牛即使在凉爽天气也需 2～3 天饮 1 次水,且饮水量,大排尿多。羊在温和天气下可以不饮水。夏季牛吃草不应超过离水源 1 天的路程,绵羊可离水源 3 天路程,骆驼可远离水源往返 12 天路程。

反刍动物贮存水分的主要部位是消化道,动物细胞的含水量变化很小,但细胞外液体随气温和营养不良而增加。绵羊、牛和骆驼夏季要比冬季细胞外含水量多出 20%～30%,用作蒸发冷却的水分贮备。

第四节　空气条件与农业生产

一、农业环境中的 CO_2 及其他气体

(一)大气中的 CO_2 与碳素循环

1.大气中的 CO_2 时空分布特征

大气中的 CO_2 是植物进行光合作用的主要原料,同时又对气候的形成和变化具有特殊的作用。工业革命前地球上的 CO_2 浓度是比较稳定的,大致在 280×10^{-6}左右。据研究,1740～1900 年间 CO_2 浓度年平均增长 0.12×10^{-6},1900～1960 年平均增加

1.26×10^{-6}，1991年已经达到355×10^{-6}，估计2000年可达到$375\times10^{-6}\sim400\times10^{-6}$。

陆地上大气的CO_2有明显的日变化。夏季由于白天植被的光合作用强，CO_2浓度的最低值一般都出现在午后，最高值出现在日出前，日振幅可达5×10^{-6}。冬季由于植物的光合作用和呼吸作用都明显减弱，CO_2的午后最低值已不明显，日振幅也减少到$1\times10^{-6}\sim2\times10^{-6}$。在作物生长季中，$CO_2$浓度的峰值一般出现在生长季开始时，低谷出现在生长季末期。

CO_2的地区分布与纬度、海陆与城市工业的分布有关。赤道附近因海温较高，CO_2的溶解度较低，导致大气中的CO_2浓度较高，而高纬度地区因海洋水温低，可溶解更多的CO_2，使得CO_2的浓度较低。大的工业中心城市附近排放量大，CO_2浓度特别高。

2.CO_2和碳素循环

大气中的CO_2有3个重要的源：①海洋。是工业革命前大气CO_2最重要的源，估计全球每年由海洋到大气的CO_2平均净通量为4.151×10^{-14} g碳；②地面。估计每年由地幔直接进入大气的CO_2有0.273×10^{-14}g碳。通过根系活动、微生物和土生动物的呼吸及土壤物质的氧化作用向大气释放CO_2，称为土壤呼吸，可使土壤空气的CO_2浓度高达大气CO_2浓度的10～50倍。Monteith认为土壤向作物提供的CO_2约占光合作用消耗的20%左右。土壤温度和水分状况直接影响土壤的呼吸强度。③人类活动。主要来自燃烧释放，估计其中的一半停留在大气中，另一半转移到其他的汇贮存起来了。

大气中CO_2的汇主要有2个：①陆地植物通过光合作用吸收大气中的CO_2合成有机物，估计陆地生态系统与大气交换的净通量为4.342×10^{-14}g碳。②地表物质的风化。主要是碳酸盐类岩石吸收CO_2和水，风化产物又被降水淋溶冲刷，地表生物体的死

亡腐烂也将CO_2带入水体，最终进入海洋。

农业生态系统的碳素循环可表示为：

$$碳平衡(B_i) = 吸收量(U_i) - 排放量(E_i) = 固定量(F_i) + 转移量(T_i) \quad (2-43)$$

估计目前全球农业生态系统对CO_2的吸收量大于排放量，碳平衡为正值，约占CO_2吸收量的10%上下，对全球的CO_2增加起到了一定的削弱作用。

二、CO_2对于农业生物的效应

(一)农作物对CO_2的吸收路径

CO_2从大气到叶绿体的路径可分为3段：①从大气到叶片附近。距离以米或厘米计，路程最长，主要通过湍流和对流来交换。②从叶片周围以气相扩散方式通过气孔进入叶肉细胞表面。距离不到1 cm。③从叶肉细胞表面到叶绿体内。距离在1 mm以下，首先要克服叶肉的阻力，然后要穿过原生质液相，到达并最后进入叶绿体的内层光化学反应中心。在整个路径中需要克服一系列的阻力，包括穿越叶片附近边界气层的阻力、气孔阻力、细胞间空气阻力、细胞壁和细胞内液相物质的阻力等，其中以气孔阻力为最大，边界层空气的阻力最小。

(二)CO_2浓度对光合作用的影响

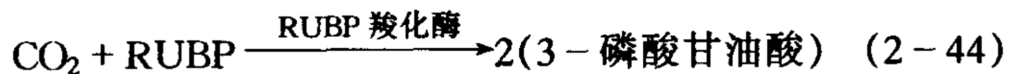
1.CO_2的饱和点和补偿点

在光合有效辐射强度满足的情况下，作物的光合作用随CO_2浓度增加而加强，当CO_2浓度增大到某一数值，光合作用不再增强，这时的浓度称为CO_2饱和点。在5～10 lx光强条件下，大多数植物的CO_2饱和点在800×10^{-6}～$1\ 800\times10^{-6}$左右。作物光合作用消耗与呼吸作用释放的CO_2达到平衡时的浓度为CO_2补偿点。玉米、高粱和甘蔗等C_4植物具有较低的CO_2补偿点，为

$0\sim10\times10^{-6}$，在很低的环境浓度下仍能捕获 CO_2 进行光合积累，在正常的 CO_2 浓度下具有较高的光合效率。所以，CO_2 低补偿点可作为作物高光合效率的一个重要标志。小麦、大豆等 C_3 作物的 CO_2 补偿点较高，为 $40\times10^{-6}\sim100\times10^{-6}$。$CO_2$ 补偿点还随作物的发育时期和环境条件而变化，在植株衰老、温度升高和水分胁迫时有所提高。

2.叶片光合作用对 CO_2 浓度增加的反应

此反应受到植物自身生物学特性和环境条件的影响。首先，不同类型的植物具有不同的光合作用机制。C_3 植物的光合作用过程中，CO_2 由二磷酸核酮糖（RUBP）羧化酶催化固定：



$$CO_2 + RUBP \xrightarrow{\text{RUBP 羧化酶}} 2(3-\text{磷酸甘油酸}) \quad (2-44)$$

再经过称为卡尔文循环的一系列反应后，生成淀粉或蔗糖等碳水化合物。在 C_3 作物的核酮糖二磷酸羧化反应中，CO_2 与 O_2 相互抑制，降低了羧化效率，并使作物具有较高的 CO_2 补偿点。在细胞间的 CO_2 浓度较高时，O_2 对光合作用的抑制下降，同时呼吸作用也减弱，使净光合作用得以增强；反之，在 CO_2 浓度较低时 O_2 对光合作用的抑制较强。

C_4 植物自身有一套浓缩固定 CO_2 的机制，通过独特的化学泵把 CO_2 富集到叶绿体附近，大大降低了 O_2 与 RUBP 羧化酶活性点结合的可能性，减少了光呼吸造成的损失，其光合效率明显高于 C_3 植物。由于气孔的调节，C_4 作物的细胞间 CO_2 浓度经常处于饱和状态，使 O_2 对光合作用的抑制在 C_4 作物中并不存在。目前大气的浓度已达到 C_4 植物的饱和点，短期的 CO_2 浓度增加对 C_4 作物的净光作用增加影响不大，而 CO_2 浓度增加将十分有利于提高 C_3 作物的光合效率。人工气候箱试验表明，增加 CO_2 浓度可使小麦、大豆、大白菜等显著增产。

仙人掌、菠萝和剑麻等称 CAM 植物，气孔在白天关闭，夜间

开放。能在白天接受阳光而在夜间固定 CO_2，光合效率虽不太高，但具有很高的水分利用效率，能适应亚热带和热带的季节性干旱气候。

进一步的实验表明，植物长期受高浓度 CO_2 处理，又会使净光合速率减慢，其可能原因是：

(1)氮素不足时羧化酶的活性下降。

(2)作物体内“源”与“汇”之间不平衡会抑制光合作用的进一步增强。“源”即进行光合同化的组织与器官，“汇”即利用光合产物的组织与器官。在高浓度 CO_2 条件下，叶绿体在白天积聚的淀粉主要在夜间向各个“汇”输出，如遇低温等不利条件，运输和利用受阻，淀粉在叶绿体内过多积聚，可显著抑制叶片的光合作用。

(3)“汇”对 CO_2 的需求量限制了叶片光合速率的进一步增长。

3. 环境条件对植物吸收利用的影响

弱光下的 CO_2 补偿点提高，需要更高浓度的 CO_2 才能弥补光照不足的影响。光照强时由于光合作用旺盛，CO_2 补偿点明显降低。在一定范围内提高 CO_2 浓度对光照不足具有补偿作用。

正在进行光合作用的叶片如突然终止光照，短时间内 CO_2 有一个加速释放的过程，称为“CO_2 猝发”，是光呼吸的重要特征。原因是在光照条件下形成的光呼吸底物尚未用完，在停止光照后仍继续氧化而释放出 CO_2。CO_2 浓度增加虽可增加光合作用和加大 CO_2 猝发之势，但也可抑制光呼吸，降低 CO_2 猝发的发生，而后者的效应要大于前者。

大气中的 CO_2 浓度升高后可使光合作用的最适温度提高，范围变窄。但过高或过低的温度在高浓度 CO_2 作用下，会导致淀粉在叶片的积累和对光合作用的抑制。

土壤水分不足，气孔导度将随 CO_2 浓度增加而下降，C_4 作物的这种现象要比 C_3 作物更加明显。也就是说，CO_2 浓度增加有利

于减轻干旱，但超过一定限度则不能缓解水分胁迫。

土壤养分状况好时 CO_2 浓度增加有利于作物的生育和增产，还可缓解养分不足对产量的不利影响。

（三）CO_2 浓度增加对植物其他生理活动的影响

CO_2 浓度变化对气孔可能产生以下不同影响：①气孔反应很小或无反应。这时蒸腾不变但光合速率增大。②气孔开度减小或部分关闭，使细胞间 CO_2 浓度有所增加。③气孔开度明显下降或全部关闭。保持细胞间 CO_2 浓度基本稳定，使蒸腾明显下降，但光合作用变化不大。C_4 作物气孔对 CO_2 浓度增加的反应要比 C_3 作物更加敏感。

细胞间隙的 CO_2 浓度随大气 CO_2 浓度增大呈高度的线形相关，但在高 CO_2 浓度下，对光合作用影响显著的不是气孔阻力，而是细胞间隙的 CO_2 浓度。

对于 C_3 植物，增加 CO_2 浓度可提高光合效率，还可导致气孔阻力增大，蒸腾减弱，从而提高水分利用效率。对于 C_4 植物，加大 CO_2 浓度，提高水分利用效率，主要是由于气孔阻力的增大。康绍忠的研究指出，大气 CO_2 浓度增加 1 倍，春小麦叶片蒸腾速率平均可减少 39.2%，水分利用效率提高 3 倍左右。

（四）CO_2 浓度增加对作物生长发育和产量的影响

1.发育期

高浓度 CO_2 使作物的碳素营养改善，有时可使某些器官的形成和发育提前。试验表明，以 700×10^{-6}浓度的 CO_2 处理后，冬小麦各发育期均比对照提前 3～4 天，比 500×10^{-6}浓度的 CO_2 处理的提早 2～3 天（图 2－7）。还发现 CO_2 浓度增加能提高植株 C/N 比，促进黄瓜的花芽分化和促进水稻开颖。

2.生物量

试验表明，冬小麦各发育期的株高随 CO_2 浓度加大而增高，

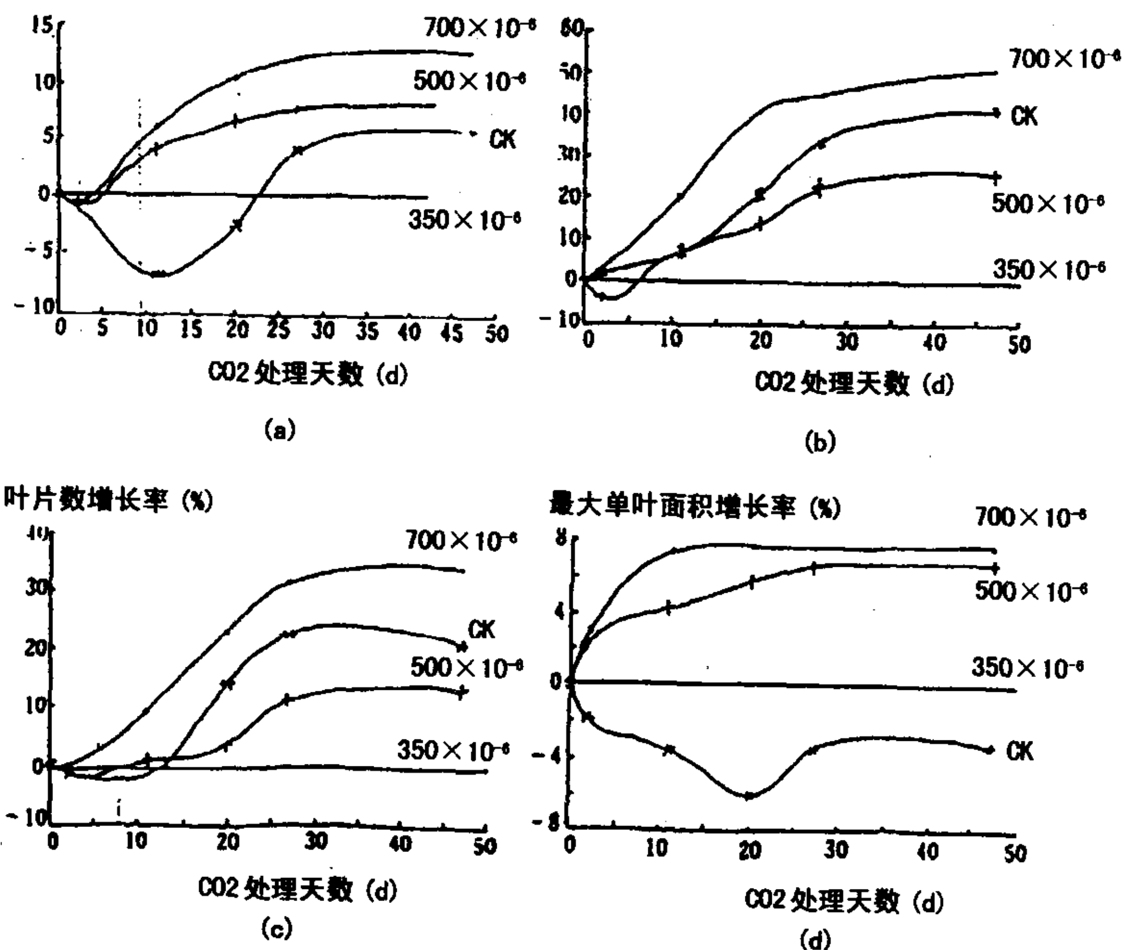


图 2－7　以不同 CO_2 浓度相对于 $350\times10^{-6}CO_2$ 浓度小麦生物量增长率的动态变化(据王修兰)

成熟时以 700×10^{-6}浓度处理的株高比对照平均增高 14 cm，500×10^{-6}浓度处理比对照高 8 cm。还观察到塑料薄膜大棚中的黄瓜也随 CO_2 浓度加大而增高。

CO_2 浓度增大后，叶片水分状况得以改善，光合产物增加，将使叶片的生长速度加快，叶片数和干鲜重增加，叶面积系数加大。据试验，700×10^{-6}和 $500\times10^{-6}CO_2$ 浓度下大白菜叶面积分别比 $350\times10^{-6}CO_2$ 浓度下增加 86.4% 和 79.1%，鲜重增加 76.1% 和 52.9%。还发现 CO_2 浓度增大后，大豆、甘薯等 C_3 作物的叶片变厚，而 C_4 作物在 CO_2 浓度增大后叶片厚度不变。

CO_2 浓度增大可使根的总干重和密度增加，在干旱条件下增加更为明显。CO_2 浓度倍增到 700×10^{-6}时棉花地下部的生物量增加 66.2%，稍大于地上部的增加(64.5%)，并形成在 350×10^{-6} 浓度下所没有的密集网状根系结构，具有很强的吸收水分、养分的能力。

3.产量

大气 CO_2 浓度增加使绝大多数作物表现出增产趋势，如 700×10^{-6}浓度下冬小麦比对照(350×10^{-6})增产近 3 成，700×10^{-6}和 500×10^{-6}浓度处理的大豆分别比对照增产 33%和 23%，700×10^{-6}浓度下籽棉单产增加 68.8%，黄瓜增产 23%～37%。于沪宁在冬小麦旺盛生长期在大田释放并保持冠层 CO_2 浓度在 600×10^{-6}～650×10^{-6}，结果在肥力较高麦田增产 10%左右，中等肥力下则增产不显著。

三、风与农业生产

风是空气相对于地面的水平运动，对于农业生物和农业生产有着多方面的影响。

(一)风对植物形态和解剖构造的影响

在风向稳定不变的地区，树木迎风面的枝条常因风的干燥作用而受伤害、抑制生长，而背风面枝条继续生长，造成明显的不对称，形成旗形树冠。

长期的大风破坏了树木的水分平衡，抑制细胞的生长和扩大。树木矮化，基干变粗，可以减轻风的压力，不易倒折。在内蒙古阴山北部年降水 300 mm 以下的丘陵上，杨树和榆树等乔木在持久的强风作用下，几乎全部只有 1 m 高左右，成为灌木状。

禾谷类作物在风雨作用下，当茎秆所承受的压力超过其自身弹性限度时可发生形变，直至倒伏或折断。对于茎的质地刚硬的树木，风会把所产生的力矩转移到根部而导致根的损伤。

风加在植物上的拖拽力 F 计算如下：

$$F = 0.5\, C_d \rho u^2 A \qquad (2-45)$$

式中　C_d 为决定于风速 u 的拖拽系数；ρ 为空气密度；A 为风向的投影面积。

平行于风向的扁平叶因 A 接近于零，所受拖拽力很小，主要产生于表面摩擦。叶片垂直于风向时，拖拽力相当大。典型的 C_d 值在 0.3～0.6 之间，如空气中含有雨滴或沙粒，则具有更大的惯性，可增加风的压力，加重倒伏。当茎秆被病虫侵袭，或风的扰动与茎秆发生共振，都会加重倒伏。

在育种时，通过降低植株高度和增强茎秆的韧性，都可以减轻风雨造成的倒伏。

(二)风的传播作用

许多植物的种子或体积微小，或带伞状绒毛(如蒲公英)，可以借助风力传播到远处。低等植物和微生物的孢子及高等植物的花粉也要靠风来传播。有些昆虫凭借高空的气流可以远距离迁飞，大气环流的变化是许多病虫害预报的重要依据。

(三)风对作物生长和产量形成的影响

风可干扰植物的生长，玉米植株受到晃动时，生长会立即停止，需 5～10 min 后才能恢复正常生长。据测定，在风速 1.8 m/s 的环境中，玉米的株高要比无风环境下降低 15%，单株干重降低 27%。风速为 10 m/s 时，光合积累仅为无风时的 1/3，树木直径生长速率要比风速 5 m/s 环境下低 1/2，比无风时低2/3。但无风或风力微弱也可造成一些异花授粉的植物结实率下降。

(四)风对植物光合作用及蒸腾的影响

风力在 2 级以下，会导致 CO_2 输送不足，使光合作用下降。首先，风速很小时，叶片边界层的厚度变大，空气质点为直线的片流运动，阻止了外界空气与叶片内部气体的垂直交换，使 CO_2 的扩散阻力加大。当风速大到一定程度，片流将被打破，代之以湍流

扩散,CO_2 的输送要比片流有效得多。

其次,气孔阻力也受到风的很大影响。据观测,气孔直径与太阳高度角和风速有关:

$$d = 0.1734 + 0.1127h_{\odot} - 1.263V_0 \qquad (2-46)$$

式中　d 为气孔平均直径(μm);$h_{\odot}$ 为太阳高度角;V_0 为风速。风速较大时可抑制气孔开放。

风引起茎叶的振动,使部分阳光能够穿越上层叶丛到达下层,改善了群体中的光分布,造成群体下部出现闪光,对提高下层叶片的光合作用量子效率具有重要意义。风速越大,振动频率越高,越有利于提高下部叶片的光合效率。在同样的风速下,柔软叶片的振动频率要高于坚硬的叶片。

$$F_v = b\,u^2 \qquad (2-47)$$

式中　b 为与叶片形状有关的参数;u 为风速。

风速加大一般会降低边界层的阻力,引起蒸腾速率加大。但如叶温明显高于气温时,风速加大会使叶片散热、叶温下降,使叶片中的水汽压降低,其效应要超过扩散阻力减少的效应,总的效应是使蒸腾下降。

进一步的研究表明,群体阻力不同的作物,风对蒸腾耗水的影响是不同的。群体阻力低时,风速加大会增加蒸腾耗水;群体阻力中等时(≥100 s/m),风速对蒸腾耗水的影响较小;群体阻力大时(≥400 s/m),风速加大可使蒸腾减少,特别是在净辐射量大时。

风对叶温及蒸腾的影响还与叶片大小有关,较大的叶片(直径10 cm 以上),风对叶温影响很大,而直径 1 cm 以下的叶片,风对叶温的影响很小。阴天的净辐射很小,叶温与气温相近,风对叶温也没有多大影响。

(五)风对家畜生产性能的影响

风可帮助家畜散发体热。气流引起畜体表面对流传热,可用下式表示:

$$Q = K u^2 \Delta t \qquad (2-48)$$

式中 Δt 为空气与家畜的温差；u 为风速；K 为常数。式(2－48)表明，当气温与家畜体温温差一定时，散热速率与风速的平方成正比。

在畜舍中，夏季要注意通风降温，冬季和早春则要注意防止过堂风和贼风使幼畜受寒致病。通风还可使舍内温度下降和消除 NH_3，H_2S，CO 等有害气体和过多的 CO_2，补充新鲜空气和 O_2，有利于家畜的健康。

第三章　农业气候

第一节　中国农业气候的特点

一、农业气候系统

农业气候系统是由农业、气候及其相互作用形成，表现为气候对农业的作用，农业对气候的反馈。农业气候系统只有在农业生产条件下才成立。农业与气候之间的物理、化学、生物过程的相互作用，决定了气候资源的农业转化效率。

农业与气候的相互作用在3个层面上进行。当太阳辐射进入大气层和下垫面时形成海气、陆气、冰雪气、冰海、生物气等相互作用，形成第一层面的大的气候系统。从下垫面中分离出农田与大气，进行系统的第二个层面的相互作用，即光、温、水、大气成分等与作物、土壤相互作用，出现光合作用、蒸散作用和热交换，这是农业气候系统的中心环节，基本的物理、化学、生物过程发生在这一层面。光合作用、蒸散作用和热交换的结果是形成生物质，即农业的第一性产品，经过动植物、工业等利用，通过排放、释放及其他形式回到大气和土壤中，参与循环，这是在第三个层面上进行的。此外，人类活动对农业气候系统的影响也是不可忽视的，可使大气与农业相互作用的过程、数量与性质发生改变，从而改变农业气候系统的性质。

二、气候的农业反馈

农业对气候有反馈作用。中国的水稻面积约有30多万 km^2，

对农业气候条件产生影响，使农田热量平衡改变，进入稻田水层的入射辐射，一部分传导到上层土壤，大部分能量以潜热、长波辐射和感热交换形式输送给大气，从而使稻田温度白天比裸地、旱地要低，夜间比裸地、旱地高。灌溉田也有水稻田相似的作用。水田与灌溉田的面积约占耕地总面积的47%之多，其用水量除去15%～30%的渗漏量外，每年约有3 000多亿 m^3 的水通过蒸散进入大气，参与水分循环。可见农业生产对气候的反馈作用是不可忽视的。

三、中国农业气候的特点

中国位于东亚区域，季风气候显著，大陆性强烈，地形、土壤条件复杂，农业生产内容和形式多种多样，形成了中国农业气候的特点。

(一)农业气候类型多样，区域性强

中国有热带、亚热带、暖温带、中温带、寒温带、高原寒带等多种农业气候带；有湿润、半湿润、半干旱、干旱等多种农业气候类型区。不同农业气候带、农业气候类型有不同的农业生产内容，与多种农业气候类型相适应，中国的农业生产形成了种类多、组合多、名优特产多、农业技术应用差别大、区域性十分强等特点，为中国发展多种农业经营和地区性名特优农产品生产提供了有利的农业气候条件。同时农业气候带、农业气候类型多，农业生产布局和发展的问题也多，农业生产须按照不同的农业气候类型、区域分类分区发展，才能充分发挥农业气候类型多的优势。

(二)雨热同季有利于扩大和发展高产作物栽培

中国主要农业区的气温升降与降水量增减在季节上同步，夏季气温高，降水量多；冬季气温低，降水量少。夏半年积温占全年积温在华南地区为60%左右，长江流域为70%～80%，华北、东北、西北大部分地区为80%以上；降水量夏半年占70%以上。雨

热同期与作物生长期需求协调一致，有利于扩大高产喜温、喜湿作物栽培，使玉米、水稻、花生、甘薯、大豆等作物栽培范围广，面积大，产量高。可见雨热同期既能较充分地发挥热量条件的作用，又能发挥较充分地降水作用，使中国的农业生产得到基本保证。

(三)农业气候资源较丰富，但利用率低，潜力很大

中国太阳辐射资源达 3 300～8 300 MJ/(m^2·年)，≥0℃积温为2 000～10 000℃·日，降水量全国平均为 640 mm，南部达到 1 000 mm 以上。东部季风区作物气候生产潜力在 7 500～3 000 kg/hm^2，而目前全国粮食平均单位面积产量为 4 000～4 200 kg/hm^2，平均产量只及气候生产潜力的 14%～53%。这说明中国农业气候资源的潜力还很大，农业气候资源利用前景十分广阔。

(四)气候灾害频繁农业生产不稳

季风的早晚、进退、摆动和滞留时期等的变异，都会造成气候异常和灾害发生。我国的农业气候灾害种类多且频繁，是农业生产不稳定的主要原因。气候灾害种类有旱灾、涝害、风灾、冻害、冷害、热害、湿害、干热风害、雪灾、雹灾等等，其中以旱灾占气候发生频次的 1/3，造成粮食减产占总损失的 50%。农业气候灾害发生频繁，自公元前 206 年至公元 1936 年的 2 142 年间，中国发生各种灾害达 5 150 次，约平均每 5 个月发生 1 次，其中旱灾 1 035 次，水灾 1 037 次，各为每 2 年发生 1 次。

气候波动大小常用气候变率表示。如降水量年际变率大小影响旱、涝发生的次数和程度。表 3－1 可以表明这种关系。

表 3－1　降水量变率与粮食产量波动

地区	年降水量变率(%)	粮食单产距平(%)
河北	20～30	8.9
浙江	15～20	6.1
云南	10～15	5.5

由上可见,气候的不稳定性是影响我国农业生产发展进程的不利因素。

第二节 农业气候资源及其利用

一、农业气候资源的特点

农业气候资源是农业自然资源的一个重要组成部分,是大气可用于农业生产的物质和能量。农业的第一性生产量由农业气候资源转换而来,因此气候资源对农业生产是极为重要的基础条件。农业气候资源包括光、热、水、气等农业气候条件。农业气候资源有如下基本特点:①农业气候资源是一种可再生资源,周而复始,用之不竭,每年都有一定数量的光、热、水、气资源再生,使农业生产有可靠的保证;②农业气候资源在空间分布上有明显区域性特点,由于地理纬度、海拔高度、海陆分布、大气环流、地形和下垫面性质等的不同以及各区域数量和质量的差异,使农业生产受气候资源区域性的制约,农业生产表现出明显的区域性特点;③农业气候资源在一个地区是有限的,每年农业生产所获取的气候资源是有一定数量的,农业生产的布局和结构具有相对稳定性;④农业气候资源具有不稳定性。气候资源具有动态的特征,有明显年际变化和季节变化以及长期气候波动,异常变化使农业生产不稳,农作物的产量出现年际波动。

可见,农业气候资源不同于其他自然资源,其利用更复杂,需要研究解决的问题更多。

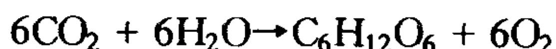
二、光资源

(一)光资源与农业

光资源包括太阳辐射量、光谱、光照时间。太阳辐射量资源是

农业利用期间单位面积上受到的太阳辐射能，以 MJ/m^2 表示。太阳辐射能量的另一种表示形式是辐照度或光量子通量密度，以 W/m^2 为单位。

对农业来说，光资源最基本的作用是光合效应。通过植物绿色体将大气中的 CO_2 和水合成有机物，把光能转换为化学能储藏起来，其通过式为：



$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

从农业气候角度来看，光合效率决定于光辐照度、温度、水分和植物的光反应特性。植物的量子效率为 8～10 个光量子同化 1 个 CO_2 分子。因此在通常条件下植物大约只有 0.6%～7.7%的光可转变成化学能。在现实的农业生产中农作物的光能利用率都不到 1%，最大只有 5%左右。由此可见，在大多数条件下总体上光不是产量形成的限制因素。

光谱的作物效应是不同的，一般地说，地球表面能接收到的太阳辐射能主要集中在 0.29～3.0 μm。而光合有效辐射约在0.4～0.7 μm 之间。不同的波长，作物光能利用率是不同的，波长较短的波段光能利用率低，波长较长的波段光能利用率高。被作物吸收最多的是红橙光(0.57～0.7 μm)，其次是蓝紫光(0.39～0.47 μm)，绿光(0.47～0.53 μm)被吸收最少，而>0.7 μm 的红外光对作物只起热效应，<0.3 μm 的光对作物有害。紫外光谱对作物形态建成有影响，0.3～0.39 μm 的光能使植物矮化。

光照时间长短对农作物生产有不可忽视的作用。光照时间长短能够反映出一个地区的太阳辐射量大小。光照时间越长，作物的光合作用时间就越长，光合产物积累越多。作物还有光周期反应，因植物对光照时间长短要求不一，有短日照作物、长日照作物和中性植物，这在纬度不同的地区引种很重要。近年来在杂交水稻中发现光敏核不育现象，即长日照作物不育系如小麦在长日照条件下可育，而在短日照条件下不育；短日照作物不育系如水稻在

短日照条件下可育，在长日照条件下不育，可见光照时间对农业生产有着极其重要的作用。

(二)年太阳总辐射量

年太阳总辐射量[MJ/(m^2·年)]决定于地理纬度、海拔高度、大气透明度、云量等，因而各地区的年太阳总辐射量不同。我国的年太阳总辐射量约在3 300～8 300 MJ/m^2。年太阳总辐射量分布的总趋势是西多东少和北多南少。大致以东经100°为界线分为东、西部地区。西部的青藏高原、新疆和河西走廊等地区太阳总辐射量除西藏东南部、天山和新疆高纬度地区较少外，多在6 000～8 300 MJ/m^2，青藏高原多在7 000 MJ/m^2，新疆、河西走廊为5 500～6 500MJ/m^2，全国最高值出现在西藏的西部为8 000～8 300 MJ/m^2。东部地区在4 000～6 000 MJ/m^2，全国最小值出现在四川盆地、贵州、湖南和湖北西部等地区，为3 500～4 000 MJ/m^2。北部多南部少的分布特点主要出现在东部地区，在整个地区为3 500～6 500 MJ/m^2，北部的内蒙古高原为6 000～6 500 MJ/m^2，黄河中、下游地区在5 000～5 500 MJ/m^2，长江流域在3 500～5 000 MJ/m^2，华南地区和云南地区的南部在5 000～6 000 MJ/m^2。台湾、海南等地达到5 000～5 500 MJ/m^2。对农业生产来说，从总体上看，年太阳辐射量当属丰富，为我国农业生产提供了能够高产的能源基础。

(三)生长期太阳总辐射量

农作物有生长期，农业气候学将平均气温≥0℃期间作为全年生长期，将日平均气温≥10℃期间作为喜温作物生长期。这对农业更有意义。由于各地≥0℃和≥10℃的起止日期不同，生长期长短不一，因而各地≥0℃和≥10℃期间的太阳总辐射量不同。

≥0℃期间的太阳总辐射量在西部的青藏高原和西北内陆地区，南北之间由于南部青藏高原生长期短而南北之间的差值不明显，多在3 200～4 800 MJ/m^2，只有青藏高原中西部≥0℃期间很

短,太阳总辐射量<3 200 MJ/m^2;在东部地区有南部多北部少的趋势,黑龙江北部、内蒙古东北部在3 200 MJ/m^2,东北中、南部、内蒙古东部在3 200～4 000MJ/m^2,内蒙古中西部、黄土高原在4 000 MJ/m^2,黄河中、下游地区在4 000～4 400 MJ/m^2,长江中、下游地区自北而南在4 000～4 600 MJ/m^2,华南地区在4 400～5 600 MJ/m^2,以华南沿海地区、海南、台湾西部为全国最高值区,达5 000～5 600 MJ/m^2。我国农作物单位面积年总产量南部高于北部的地区分布差异,与全年生长期间太阳总辐射量上述分布有一致的关系。

图3-1指示了日平均气温≥0℃期间各地的太阳总辐射量(MJ/m^2)。≥10℃期间的太阳总辐射量由于大部分地区生长期进一步缩短,各地的差异更明显,高海拔地区和北部高纬度地区太阳总辐射量显著减少,东北地区、内蒙古在1 800～3 200 MJ/m^2,黄河中、下游地区在3 200～3 600 MJ/m^2,长江中、下游地区在3 500～3 600 MJ/m^2,四川盆地和贵州等地减少甚小,在3 200 MJ/m^2,华南地区在3 600～5 600 MJ/m^2,云南为3 600～5 200 MJ/m^2。

从以上全国分布看,生长期间太阳总辐射量以西部和西北部多,但因温度低、降水量少、生长季短而影响了农业生产的光资源利用;东部因生长期长、温度高、降水量多,农业生产比西部和北部发达。西部地区农业光能生产的潜力还很大。

(四)年日照时数

我国年日照时数地区间差异大,变幅在1 200～3 400 h。日照时数分布趋势表现出西部高于东部,北部多于南部,青藏高原年日照时数多在2 400～3 400 h,同纬度的长江中、下游为2 000～2 200 h,黄河中、下游南部为2 200～2 600 h;西部的新疆和河西走廊为2 600～3 400 h,同纬度的华北地区北部为2 800～3 200 h,东北地区为2 400～2 800 h。西部地区自南部的青藏高原至北部的新疆、河西走廊等地区,它们之间的年日照时数差异不明显,

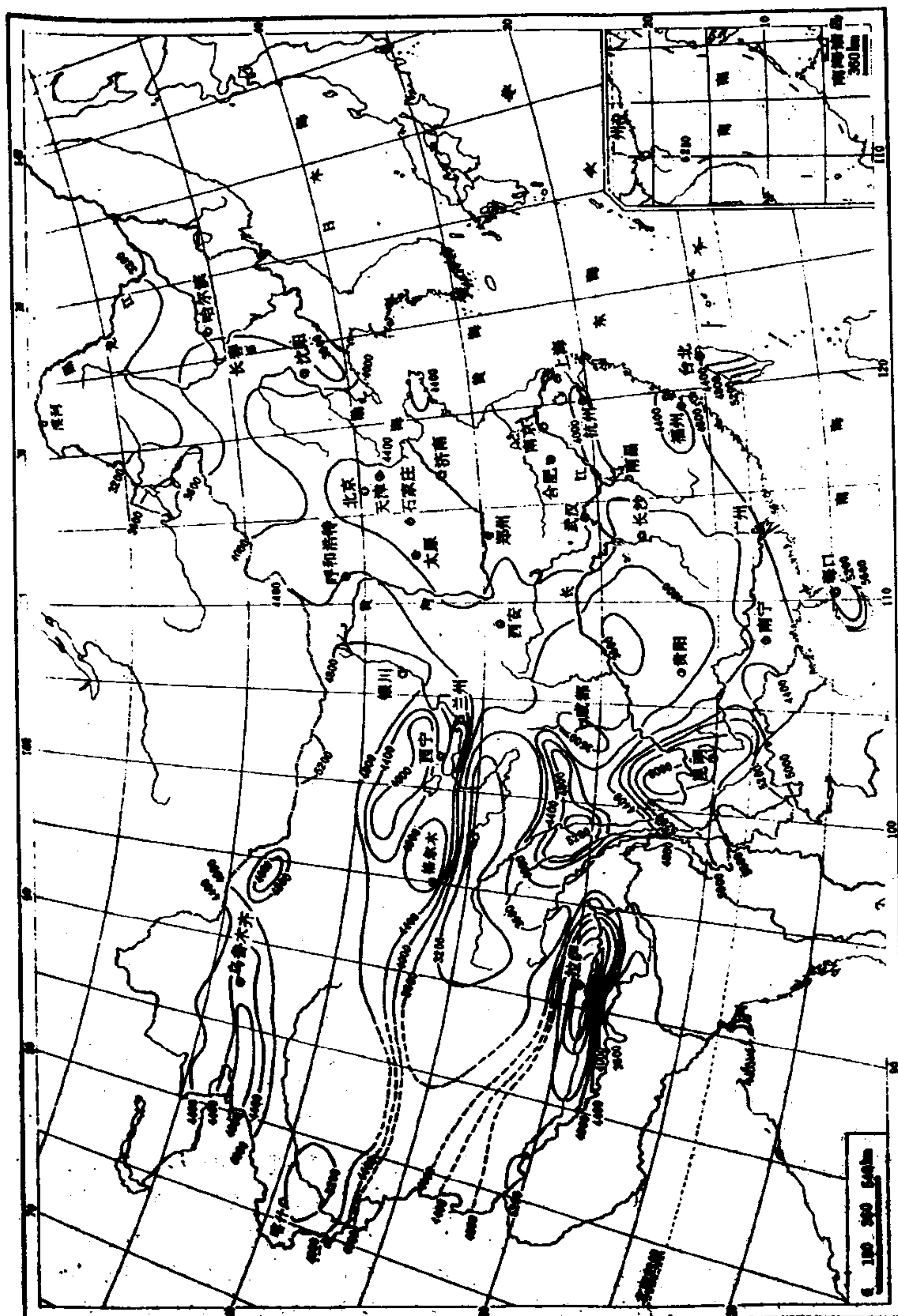


图 3-1 日平均气温≥0°C期间的太阳总辐射量 (MJ/m^2)（侯光良等 1993）

多在2 600～3 400 h之间。东部地区从华南地区到内蒙古、东北地区北部，年日照时数有逐渐增多趋势，华南地区为1 800～2 200 h，海南的西部达到2 400～2 600 h，台湾西部达2 400 h；长江流域中、下游1 600～2 200 h，四川盆地、贵州、湖南与湖北西部为年日照时数低值中心，为1 200～1 600 h；云南地区受西南季风的影响，冬半年干旱、晴天多，日照时数较多，达2 000～2 400 h；黄河流域中、下游达2 200～2 800 h；内蒙古为2 800～3 200 h，东北地区2 400～2 800 h。

(五)生长期间日照时数

≥0℃和≥10℃期间日照时数各地有差异。≥0℃期间的日照时数受两种条件的影响，一是受云量和降水条件的影响，降水日数多的地区日照时数少；二是受≤0℃期间的日数多少的影响，≤0℃的日数愈多，日照时数愈少。因而出现黄河流域多，长江流域少，西部地区少，华南较多。拉萨因晴天多，虽≤0℃的日数较多，日照时数仍多。≥10℃期间的日照时数大致随≥10℃期间的日数增加而增多，不过长江流域阴雨日数的影响仍大于≤10℃日数的影响，日照时数比黄河流域偏少。从一个地区看，都是随生长期的起点温度增高而日照时数减少。从表3-2中可以看出上述情况。

(六)光合有效辐射

绿色植物不能利用全光谱的太阳辐射能，只能吸收0.30～0.75 μm波段的辐射能，即可见光部分，紫外线和红外线都不能吸收。可见光对作物的生理过程和生长发育有十分重要的作用。0.30～0.75 μm称为生理辐射或光合有效辐射波段。在太阳总辐射的光谱能量分布中，光合有效辐射约为0.42～0.52，一般采用0.47计算光合有效辐射量。

年光合有效辐射量全国为2 000～3 400 MJ/m^2，我国西部多于东部，青藏高原、新疆、河西走廊、内蒙古西部等地区多在2 600～3400MJ/m^2。其中西藏南部和新疆北部较少，小于2200～

表 3-2 主要地点各界限温度期间的日照时数及日平均值

地点＼项目＼界限温度	≥0℃期间		≥5℃期间		≥10℃期间		≥15℃期间	
	总时数	日平均值	总时数	日平均值	总时数	日平均值	总时数	日平均值
哈尔滨	1 670	7.9	1 440	8.0	1 186	8.2	853	8.2
沈阳	1 827	7.6	1 587	7.8	1 331	7.8	1 000	7.8
北京	2 144	8.0	1 908	8.1	1 645	8.2	1 329	8.3
郑州	2 068	6.7	1 790	7.0	1 562	7.2	1 249	7.4
南京	2 007	6.0	1 688	6.3	1 465	6.5	1 190	6.7
武汉	1 987	5.7	1 712	6.1	1 518	6.4	1 247	6.9
长沙	1 677	4.6	1 473	5.0	1 324	5.4	1 130	5.9
广州	1 906	5.2	1 906	5.2	1 779	5.3	1 490	5.6
兰州	1 982	7.5	1 679	7.7	1 381	7.8	937	8.0
成都	1 228	3.4	1 147	3.5	963	3.8	799	4.1
昆明	2 470	6.8	2 470	6.8	1 680	6.4	946	5.8
乌鲁木齐	1 988	9.1	1 753	9.4	1 495	9.6	1 115	9.8
西宁	1 845	7.8	1 515	7.8	1 056	7.9	375	8.0
拉萨	2 305	8.2	1 738	8.2	1 190	8.0	177	7.7

2 600 MJ/m^2。东部地区在 1 800～2 400 MJ/m^2。东北地区为 2 000～2 400 MJ/m^2，内蒙古中、东部为 2 200～2 800 MJ/m^2，黄河中、下游为 2 400 MJ/m^2 左右，长江中、下游为 2 200 MJ/m^2 左右，华南地区多为 2 200～2 400 MJ/m^2，四川盆地和贵州等地为全国低值区为 1 800～2 000 MJ/m^2，西藏的中西部为高值区，达 2 800～3 000 MJ/m^2。在我国主要农业区的东部地区，光合有效辐射的分布较均衡，一般都能满足高产之需。西部光合有效辐射量丰富，光合生产潜力大。

(七)光资源的季节变化

我国的太阳辐射量全国大部分地区都是夏季所占比率最大，春季次之，冬季最小，而云南大部分地区因受西南季风的影响，夏

季多雨高湿，最大值出现在春季，其次是夏季，冬季最小。

作物生产的季节性须与太阳辐射的季节变化相协调才有利于获得高产，要求太阳辐射量出现最大值的季节与作物叶面积系数最大值出现的季节一致，光合作用的产物也就最大。我国东北地区、西北地区、青藏高原等一熟制区与太阳辐射出现的最大值季节相一致。黄河流域中下游地区冬小麦、玉米二熟制的地区，夏初收获越冬作物后出现作物生产季节衔接和叶面积系数小的时段，对利用夏季的太阳辐射不利，应采用套作和育苗移栽等措施加以弥补。长江流域双季晚稻因采用育苗移栽有利于太阳辐射资源的利用。华南地区季节变化的幅度较小，有利于作物周年利用。

总之，我国的光资源可以归纳为以下几点：①光合资源属丰富，能够充分满足农业生产高产的需求，而且光合生产潜力很大。②我国的光资源与作物生产的季节需求基本相适应，生长期间的太阳辐射量较丰，有利于作物高产稳产。③我国光资源的地区分布不够理想，西部多，但因气温低、生长期短、水分不足，限制了光资源的充分利用；而东部有些地区有些月份光资源少，不利于农业生产的利用，需要注意不同需光作物的选用，以弥补光资源分布少的地区的不足。

三、热量资源

（一）热量资源与农业

热量资源是农业生产重要的环境因子，农业生物的生存和生育、农业的布局和结构以及第一性生产量都受热量条件的制约。热量资源包括积温、其他温度条件、生长期和无霜期等，这些都直接影响农业生物的生长发育、分布界限和产品产量等。我们可将积温作为热量资源，将温度作为热量条件。青藏高原光资源丰富，但因温度低，热量资源不足，不能种植喜温作物，喜凉作物栽培也受温度低的限制，秋播小麦有北界，春播小麦有南界。我国是多熟

种植的国家，熟制的地区分布主要受热量资源的影响。东北地区由于热量资源不充足，只能种植一年一熟作物；黄淮海地区可种喜凉作物与较短生育期的喜温作物搭配，实行二熟制，由于热量不充足，两熟喜温作物不能越冬或不能充分成熟。大多数林木的分布受热量资源的制约，亚热带作物龙眼、荔枝、油桐、茶等，热带作物橡胶、油棕、咖啡、可可等，温带的苹果、梨等都有较明确的气候栽培界限。畜牧业的畜禽种类、经济昆虫的蚕、紫胶虫等以及害虫许多种类的的繁殖代数都受热量条件的制约。因此，热量资源是重要的和不可代替的农业气候资源之一。

(二)日平均气温≥0℃的积温

≥0℃的积温是全年作物开始至终止生长期间的热量资源，也代表全年热量资源。我国≥0℃的积温从南至北递减(图 3－2)，华南地区达 6 500～9 000℃·日，长江流域中、下游至四川盆地为 5 000～6 000℃·日，黄河流域中、下游为 4 000～5 000℃·日，东北地区为 2 000～2 400℃·日，内蒙古东、中部地区为 2 500～3 000℃·日；从青藏高原至东部沿海，由于海拔高度由西向东递减，而≥0℃积温大致由西至东递增，沿海地区北部的 4 000℃·日至南部的 8 000℃·日，青藏高原为 1 000～4 000℃·日，西藏东南边缘地区达 4 000～5 000℃·日。西北部的新疆和内蒙古西部由于地形和降水稀少、太阳辐射强，比同纬度的内蒙古中、东部和东北地区≥0℃积温值大，新疆达 2 500～5 000℃·日，内蒙古东部和东北地区为 2 000～4 000℃·日，四川盆地比同纬度的长江中、下游地区多出 500～1 000℃·日，达 6 000～6 500℃·日。云贵高原比同纬度东部地区少出 500～1 000℃·日，南海诸岛属典型的热带气候，≥0℃的积温 9 000～10 000℃·日，台湾与海南达到 8 000～9 000℃·日。

(三)日平均气温≥10℃的积温

日平均气温≥0℃的积温表示喜温作物生长期的热量资源。

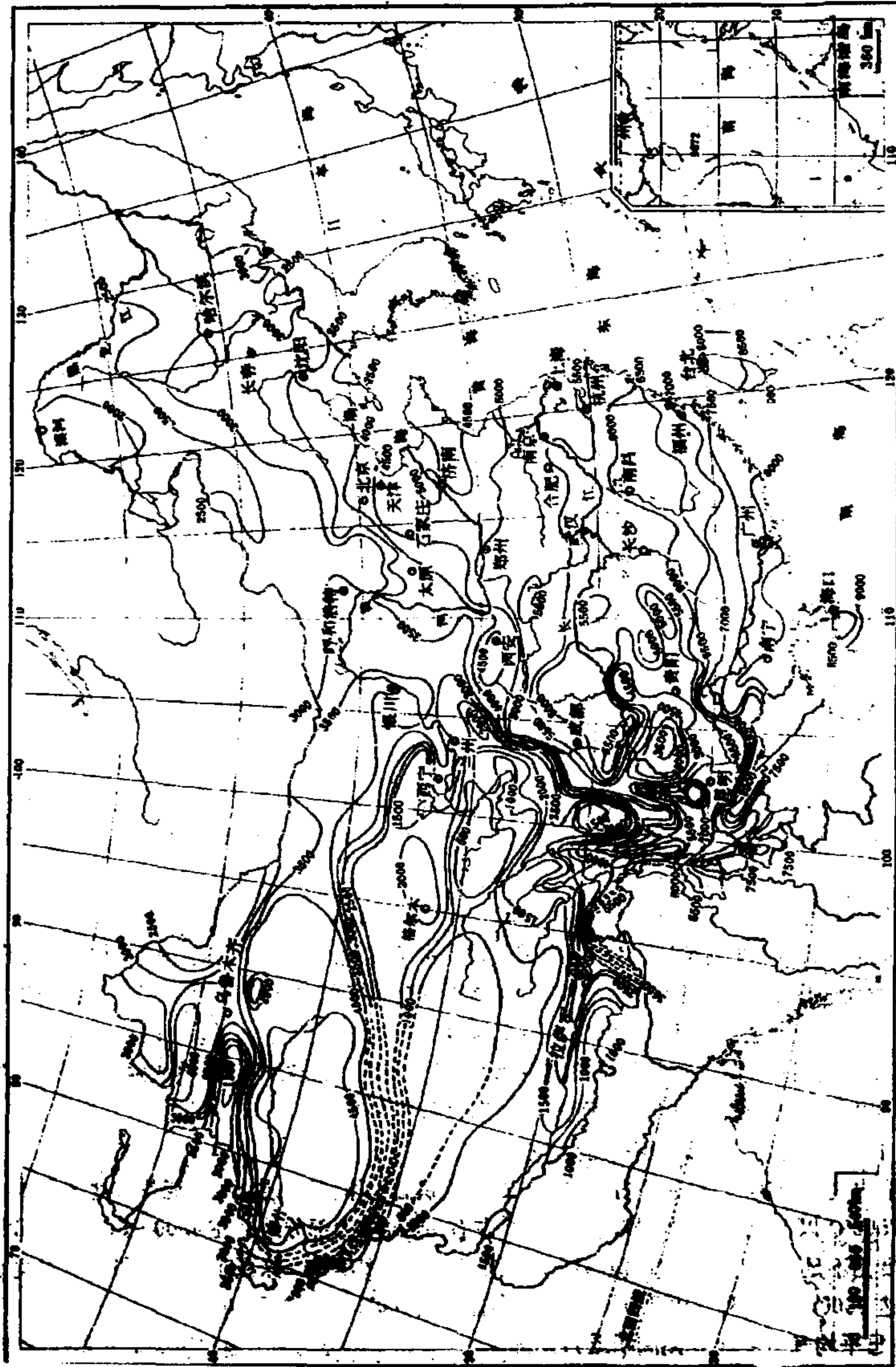


图 3-2　日平均气温≥0°C的积温（°C）（侯光良 1993）

我国日平均气温≥10℃积温分布与≥0℃积温分布相似，但其值随≥10℃期间日数的减少而减小。西部地区由于海拔高的缘故，表现出北部多于南部的趋势。青藏高原东南边缘地区可达3 000～5 000℃·日外，青藏高原的其余地区<2 000℃·日，其中有相当大的部分地区<1 000℃·日；新疆、河西走廊、内蒙古西部等地区在2 500～4 000℃·日，吐鲁番盆地达到4 500～5 000℃·日。东部地区则由北而南逐渐增加，由黑龙江北部、内蒙古东北部的1 500～2 000℃·日至海南岛和台湾南部的9 000℃·日。东北地区中南部为2 000～3 500℃·日，内蒙古中、东部为2 000～2 500℃·日，黄河流域中、下游地区为3 500～4 700℃·日，秦岭以北的黄土高原为3 000～4 000℃·日，长江流域中、下游地区为4 500～6 000℃·日，四川盆地为5 000℃·日，云贵高原比同纬度东部地区少500℃·日左右，华南地区为6 000～9 000℃·日，南海诸岛9 000～10 000℃·日。从日平均气温≥0℃和≥10℃的积温分布来看，我国的热量条件是优越的，除东北北部、内蒙古大部地区不能种喜温作物外，玉米、水稻等高产作物的种植范围广、产量高，同时为多熟种植提供了热量条件保证。黄淮海和陕西中部、山西南部可实行一年二熟制，长江流域南部至华南地区可实行一年三熟制。我国积温分布的地区差异大，为要求不同热量条件的多种生态类型的作物提供了多种类型的热量资源。≥0℃积温2 000～3 500℃·日的中温带有春小麦、高粱、谷子、大豆、玉米、粳稻等，3 500～4 700℃·日的暖温带有冬小麦、玉米、大豆、花生、苹果、梨等，4 700～6 500℃·日的北、中亚热带有水稻、油桐、茶、桑蚕等，6 500～8 000℃·日的南亚热带有水稻、荔枝、龙眼、甘蔗等，>8000℃·日的热带有橡胶、咖啡、胡椒及其他热带作物。

(四)作物生育期热量条件

作物生育期热量条件可分喜凉作物和喜温作物生育期热量条件。以冬小麦代表喜凉作物生育期热量条件，以玉米、水稻代表喜

温作物生育期热量条件。

冬小麦:冬小麦生育期的热量条件虽然全国各地生育期长短相差很大,但由于各地生育期(不包括越冬期)平均气温差异较大,冬小麦生育期长短有随温度升高而缩短的规律,而使积温的地区差异缩小。全国冬小麦生育期间的积温在2 000～2 200℃·日,部分山地春季阴雨日数多的地区可少到1 800℃·日,云南高原南部和新疆南部因种植晚熟品种达到2 400℃·日。

一季水稻:全国各地都有一季稻栽培,各地一季稻生育期间的积温相差较大。东北地区和华北地区种植粳稻,前者种植早熟粳稻品种,后者种晚熟粳稻品种。东北地区生育积温为2 000～3 000℃·日,华北地区为3 000～3 500℃·日,长江流域和华南地区在3 000℃·日左右。云贵高原生育期平均气温较低,作物多晚熟品种,生育期积温为3 000～3 500℃·日,云南南部达3 500～4 000℃·日。

以上可见,我国各地作物生育期间积温差异受作物的影响较大,表现出历冬作物地区差异小于历夏作物,生育期长的作物积温大于生育期短的作物。同一作物晚熟品种积温大于早熟品种,而同一作物、同一品种各地积温差异小。

(五)无霜期和生长期

农业热量资源是和生长期联系起来的,常用无霜期和生长期来衡量热量资源持续时间的长短。无霜期通常用地面最低温度≤0℃的终日至初日之间持续日数表示。

我国无霜期的分布东、西部之间不同。西部的青藏高原和西北内陆地区因海拔高度不同而有异,青藏高原海拔高、气温低、无霜期短,其东南部为100～150日,大部分地区<50日;新疆在100～200日,河西走廊为100～150日。东部的东北地区为100～150日,内蒙古中、东部多为100日,黄河流域中、下游地区为150～220日,长江流域中、下游为220～300日,华南地区为>300日。

生长期是植物的生长季节，从第一批植物萌动生长至停止生长或进入越冬时为生长期，这与日平均气温≥0℃的初日和终日较一致，一般用日平均气温≥0℃的初日至终日的持续日数表示生长期。我国东部的东北地区为170～250日，内蒙古大部分地区为170～225日，黄河流域中、下游地区为250～325日，长江中、下游地区为325～365日，华南区全年都是生长期。西部的青藏高原东南部达到200日，东部在150～200日，中、西部地区<150日，新疆和河西走廊为200～250日。一般情况下，无霜期长于喜温作物生长期，短于喜凉作物生长期。

(六)温度条件

温度是作物生长发育和产量形成的条件，热量资源的基础是温度与持续日数，因此热量资源与温度不可分，温度的高低和强弱都影响作物生产，影响气候资源的利用效率，因此分析农业热量资源必须分析温度条件，也有将温度条件作为热量资源的一个部分来对待。温度条件包括平均温度、极端最高和最低温度、最热月和最冷月气温，以此来表示一个地区的热量状况。平均气温表示综合热量条件，极端最高和最热月平均气温表示一个地区热量条件的上限和范围，可评价作物的热量条件；极端最低和最冷月平均气温表示一个地区热量条件的下限和范围，可以评价作物的越冬条件。在有些情况下，单用积温评价热量资源的可用性还不够，需用温度来评价热量资源的利弊。例如，棉花种植需要≥10℃积温3 300℃·日，需要最热月平均气温≥22℃，在昆明≥10℃积温为4470℃·日，邢台≥10℃积温为4 495℃·日，两地热量资源相近，但昆明最热月平均气温为19.8℃，不能满足棉花生育的要求，邢台最热月平均气温为26.8℃，能满足棉花生育的要求，故昆明不能种棉花，而邢台能种植，可见棉花的能否种植受温度条件的制约。再如冬小麦生育要求≥0℃积温2 000℃·日，最冷月平均气温>-10℃，极端最低气温>-22～-24℃，在张家口≥0℃积温

3 679℃·日，承德为 4 016℃·日，两地都能满足积温的需要。但承德最冷月平均气温为 -9.50℃，极端最低气温 -23.30℃；张家口最冷月平均气温为 -10.30℃，极端最低气温 -25.70℃。张家口冬小麦越冬有较严重冻害，种植冬小麦不利；而承德越冬冻害轻，可以种植冬小麦。由此可见，热量资源的利用必须和温度条件结合起来考虑才能确定其适宜性。

(七)热量资源的时间变化

热量资源有年际变化和季节变化，对农业生产的稳定性和农事活动安排有影响。热量条件的年际变化以相对变率来表示，变率越大，热量条件的年际变化越大。我国积温相对变率分布一般规律是高纬度地区变率大，高海拔地区变率大，即积温量小的地区变率大，这些地区农业受热量变化的影响大。≥0℃积温相对变率(1%～6%)小于≥10℃积温的相对变率(2%～10%)，表明喜温作物生长季节热量条件不稳定，常造成熟制的后茬产量波动大，还出现冷害、热害等灾害，对农业生产有一定的影响。

四、水分资源

(一)水分与农业

水分是农业生产的基本条件之一，制约着作物生长发育和产量形成。农业用水量占全国用水量的 80%以上。我国农田有效实灌面积 4 476.8 万 hm^2(1996 年)，灌溉农田的粮食产量占全国粮食总产量的 2/3。可见水分对我国农业是至关重要的。陆地上水分的来源是大气降水。因此，降水量是水分资源的主体。我国的许多农业气候类型是由降水量形成的，从少到多的地区分布，形成干旱、半干旱、半湿润、湿润等不同农业气候类型。降水量的分布对农业的布局和结构、农业种植类型和产量水平有决定性的影响。农、林牧的分布界限与降水量密切相关，在降水量＜250 mm 的地区为干旱牧业区，没有灌溉就没有种植业；250～450 mm 的

地区为半干旱农牧业区，以牧业为主，少有旱地农业；450～800 mm地区为半湿润农业，而>800 mm地区为湿润农业。农作物的种类和品种随降水量的分布而有异，在半干旱地区种植耐旱的糜、粟等，在半湿润地区种植玉米、大豆、甘薯等，在湿润地区种植水稻的面积大。种植制度受降水量的影响，450～800 mm以一熟制和旱二熟制为主，>800 mm可以二熟和三熟制。水分是农作物光合生产的原料之一，因而降水量影响农作物的产量，单产量和总产量都与降水量有关。从表3－3可见小麦产量与水分气候之间的关系，降水量与需水量相近小麦产量高，过少和过多产量都低。降水量对放牧业的影响也很大。牧区主要分布在干旱半干旱地区，草原产草量与降水量关系极为密切。表3－4表明不同降水量的地区产草量明显不同。

表3－3 不同降水量气候类型与小麦相对产量

地区	小麦生育期气候类型	小麦生育期降水量(mm)	小麦相对产量(%)
内蒙古	干旱半干旱	50～200	55.6
河北	半干旱	150～200	96.8
河南	半湿	200～300	115.5
江苏	半湿至湿	250～500	136.1
湖北	湿	300～600	99.1
江西	过湿	500～900	45.1

总之水分对农业生产的影响是巨大的。

(二)年降水量

年降水量表示一个地区全年水分来源状况。我国年降水量全国年平均640mm，全球年平均975mm，相比我国的降水偏少。

表 3－4 不同类型草原的产草量与降水量

类 型	歉年		平年		丰年	
	降水量 (mm)	产草量 (kg/hm²)	降水量 (mm)	产草量 (kg/hm²)	降水量 (mm)	产草量 (kg/hm²)
草甸草原	300	800	3 000～4 000	800～1 000	400	1 000
典型草原	250	600	250～350	600～800	350	800
荒漠草原	150	400	150～300	400～600	300	600
荒 漠	50	200	50～100	200～300	100	300

年降水量的分布趋势是从南向北和从东向西减少。这种状况与海陆分布、地形有关，东部和南部地区邻近太平洋和印度洋，降水量多，离海洋远的北部和西部降水量少，青藏高原由于阻止印度洋水汽北上，影响了降水量的分布。华南地区年降水量为 1 600～2 000 mm，长江中、下游为 1 000～1 600 mm，四川盆地 800～1 400 mm，淮河流域和黄河中、下游为 600～800 mm，东北地区 400～1 000 mm，内蒙古 50～400 mm，云贵高原为 800～1 800 mm，青藏高原东部为 400～600 mm，东南部边缘为 600～2 000 mm，其余地区为 50～400 mm，西北地区的新疆、河西走廊、内蒙古西部等地为 50～200 mm，有些山地(天山)达 300～600 mm。从降水量的分布可见，我国北部、西北部、青藏高原的农业生产的发展受到降水量的限制。

从全国的降水量状况(图 3－3)可以看出，我国降水量的地区分布差异显著，南部多，北部少；季节分配不匀，夏季多，冬季少；年际变率大，大部分农业区为 10%～30%，西北地区达 50%以上，降水量变率大常造成旱涝灾害。从多年平均状况看，雨与热、雨与作物的需要大体协调，但也有季节性不协调和降水量与需水量不协调的现象，如南方 6～7 月的“梅雨”或 7～8 月的伏旱；西北地区夏季的干热，降水量不足等，这些都对农业生产构成影响。

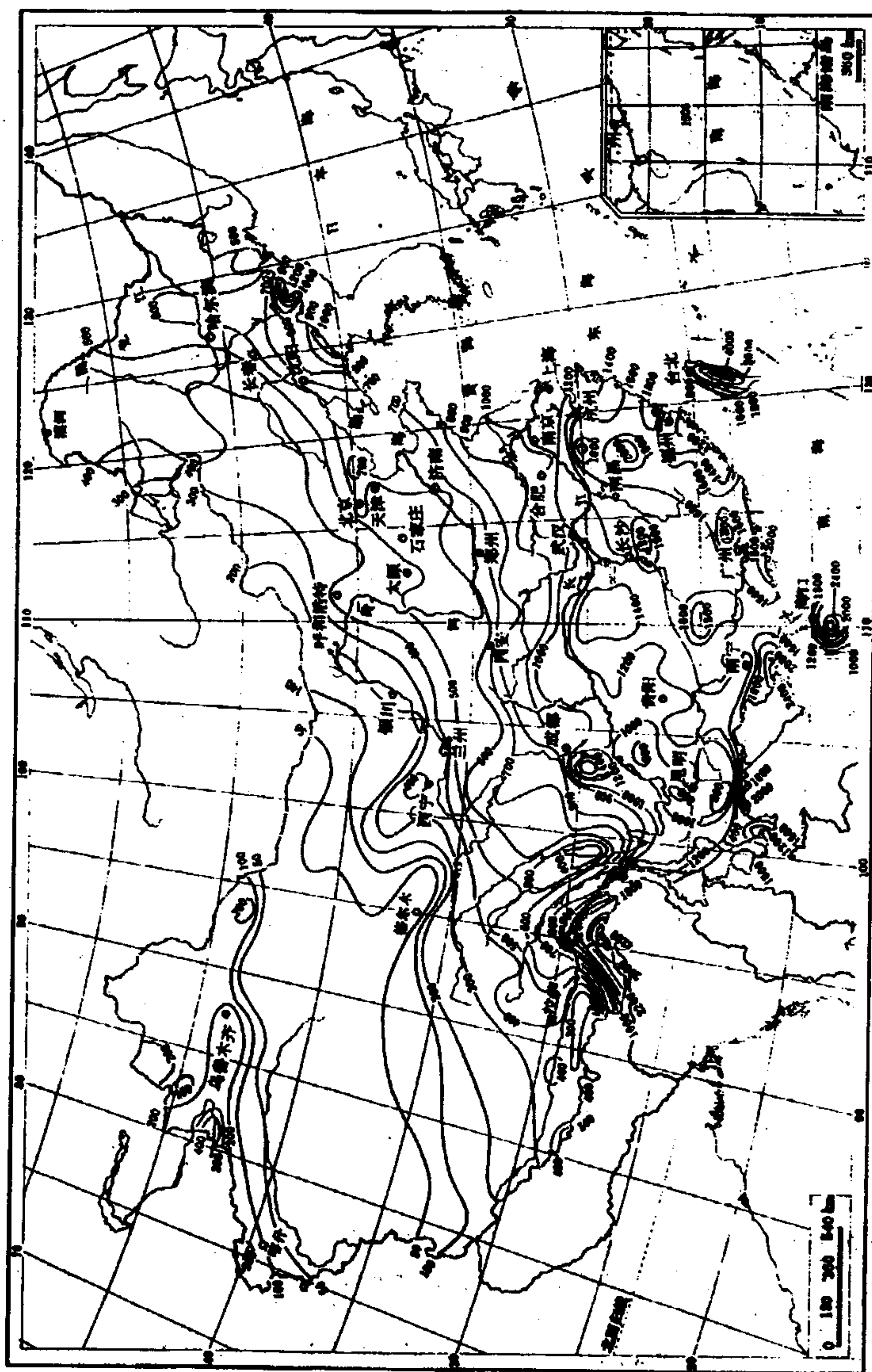


图3-3 年降水量（mm）（侯光良等 1993）

(三)作物生长期间降水量

日平均气温≥0℃期间的降水量:我国由于日平均气温≥0℃的持续日数在南方多于330天,在北方虽然持续日数180～300日,但因降水量集中在夏季,≤0℃期间的降水量很少,因此,≥0℃期间的降水与年降水量很接近。南方与北方的降水分布趋势相近,只有新疆北部冬、春季降水量较多,南疆、东北、华北北部、西藏北部因≤0℃的日数较多,≥0℃期间降水量与年降水量差值较大,年降水量比≥0℃期间的降水量可多100 mm。

日平均气温≥10℃期间的降水量:我国日平均气温≥10℃期间的降水量随≤10℃的日数增加而减少。华南地区南部全年≥10℃,降水量为1 800～2 000 mm,华南地区北部1 400～1 600 mm,长江流域中、下游为800～1 600 mm,黄河流域中、下游500～700 mm,东北地区为300～800 mm,内蒙古为50～400 mm,青藏高原东南部为300～600 mm,东南部边缘地区为600～1 800 mm,其余地区在50～300 mm,新疆除天山地区外多在50～100 mm。≥10℃期间降水量比年降水量减少的量各地不同,长江流域以南地区约减少200 mm,黄河流域中、下游减少约100 mm,西北地区约减少<100 mm。≥10℃期间降水量与年降水量之间这种现象说明我国≤10℃期间降水量少,对农业生产季节性的影响较小。

(四)作物生育期间降水量

作物生育期间降水量直接影响作物的生育和产量,从作物生育期间降水量可以了解我国降水量的分配与适宜性。我国作物生育期要分喜凉作物和喜温作物两大季,以冬小麦和水稻为代表。

冬小麦生育期间黄河流域中、下游地区降水量为150～250 mm,淮河流域为250～300 mm,长江流域中、下游为500～900 mm,华南地区为200～500 mm,云贵高原为100～200 mm,四川盆地为200～350 mm,青藏高原冬小麦地区为300～500 mm,新

疆有冬小麦的地区为 50～200 mm。降水量这种分布形成北方缺水，南方水分过多，在华北平原北部形成一个冬小麦少雨中心(＜150 mm)，在长江流域中、下游南部形成多雨中心(600～900 mm)，对这些地区冬小麦生产是不利的。

水稻(一季稻)生育期间主要种植区的降水量都较丰富，东北地区 400～700 mm，黄河中、下游地区在 500～700 mm，长江流域中、下游地区在 500～800 mm，华南地区为 600～1 000 mm，云贵高原地区为 600～1 000 mm，内蒙古地区 200～400 mm，西北地区的新疆为 25～100 mm，内蒙古和西北地区靠灌溉种植水稻。水稻生育期降水量多少主要决定于各地水稻生育期的长短和地区分布，水稻主要种植在夏季，因季风雨主要集中在夏季，大部分地区水稻种植季节的降水量较丰富。南方双季早稻生育期间降水量在长江流域为 500～1 000 mm，江南中部达到 900～1 000 mm；华南地区为 600～1 100 mm，其东部和西部较少，中部达 900～1 100 mm；云贵高原南部为 400～600 mm。双季晚稻生育期降水量从长江流域向华南地区增加，长江流域为 500～600 mm，华南地区为 600～1 000 mm。除长江流域有伏旱外，生育期间总降水量仍较丰富。

(五)降水量时间变化

我国降水量年际变化和季节变化都很明显。常用年变率表示年际变化的大小。

$$V_n = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} | d_i | \frac{100}{R}\% \qquad (3-1)$$

式中　V_n 为降水量年变率；R 为 n 年平均降水量；d_i 为第 i 年降水量距平($R_i - R$)；n 为年数。

年际变率大的地区各年之间降水量差异大，降水量不稳定，易出现旱涝问题，影响农业生产的稳产高产。我国降水量年变率北方大于南方，东南沿海小于西北内陆。一般表现为年降水量越大

的地区，年变率越小；年降水量越小的地区，年变率越大。长江流域南部和西南地区年变率最小，均在15%以下；东北地区其次，大部分也在15%以下；华北地区与淮河流域年变率显著偏高，华北大部分地区年变率大于25%，淮河干流附近达20%；华南沿海因台风次数的年际变率大，年降水量变率也较大，达20%；内蒙古和西北等干燥气候区年变率在30%以上，新疆南部大于40%。

(六)水分盈亏量

一个地区农业水分资源状况，决定于农田水分的收支。采用下式表示农田水分平衡：

$$\Delta W = R - ET - S_1 - S_2 \qquad (3-2)$$

式中　ΔW 为农田水分盈亏量；R 为大气降水量；ET 为蒸散量，即作物蒸腾和土壤蒸发的总量；S_1 为农田径流量；S_2 为渗漏量和地下水向上补给量。在无农田径流量和地下水补给的条件下得到下式：

$$\Delta W = R - ET_m \qquad (3.3)$$

式中　ET_m 为作物需水量，即最大蒸散量，采用彭曼法计算。

$$ET_m = K_c \cdot ET_o \qquad (3-4)$$

式中　ET_o 为参考蒸散量，根据水汽压差值、风速、净辐射、温度和海拔高度以及有关系数计算；K_c 为作物系数，各种作物的 K_c 依各生育阶段而定，如冬小麦全生育期为0.8～0.9，水稻为1.05～1.20，玉米为0.75～0.90，棉花为0.8～0.9。

根据式(3-2)计算出全国农田水分盈亏量分布，在淮河至秦岭的农田水分盈亏量为0，在此以北为亏，以南为盈。华南地区盈余200～1 000 mm，海南中东部盈余400～1 000 mm，长江中、下游地区盈200～800 mm，江西东部，浙江西部和福建北部盈800 mm，长江流域北部至淮河流域盈0～200 mm，云贵高原盈200～600 mm。云南北部亏200 mm，淮河以北至黄河流域中、下游南部亏0～200 mm，黄河流域中、下游的中北部为亏200～400 mm。

东北地区的东南部盈余量为 200 mm，中部亏 200 mm，西北部为亏 200～400 mm；内蒙古东部亏 200～400 mm，中部亏 400～800 mm，西部亏 800～1 200 mm；黄土高原亏 200～600 mm；青藏高原东南部的小部分地区有盈余，其余亏 200～600 mm；新疆地区亏 600～1 200 mm。农业水分盈亏量表明我国北方缺水，南方水分过多，因此，应根据水分布局农业生产，使不同地区的水资源都发挥最佳生产效益。

五、空气资源

我国农业气象学家提出空气资源作为农业气候资源的一部分，发展了农业气候资源的内容。与农业有关的空气资源主要指二氧化碳(CO_2)、氧(O_2)、氮(N_2)等，它们都是农业生产的资源。这些空气成分都有地区差异和季节变化。如大气中的 CO_2 含量随海拔高度的升高而减少，我国陆地的海拔高度由东至西增高，CO_2 含量在东部沿海和东北地区较高，其密度达到 0.55 mg/l；在长江流域南部、四川盆地和华南地区、黄河流域中游、内蒙古东北部等达到 0.50～0.55 mg/l；内蒙古中部和西部、新疆地区、云贵高原为 0.45～0.50 mg/l；青藏高原为 0.35～0.45 mg/l。CO_2 密度有季节变化，冬季高、夏季低。

氧是生物呼吸必需的气体，作物的光合速率随氧含量的减少而下降，一般高原地区出现喜凉作物高产与低氧含量抑制光合呼吸有关。大气中氧的含量随海拔高度的增高而减少。在东部低海拔地区大气氧的含量＞260 mg/l，内蒙古中、西部和新疆地区、云贵高原为 240～260 mg/l，青藏高原为 180～240mg/l。氧的含量有季节变化，冬季高于夏季。

氮是植物的 3 大营养元素之一。大气中有含量极丰富的氮，占体积的 78%，但作物不能直接利用，只有细菌和藻类可以固定大气中的氮，它是农业的一种潜在气候资源。大气中氮的含量随

海拔升高而减少，在海平面氮的年平均密度为920 mg/l，即每立方米气体中含氮近1 000 g，海拔1 000 m的地区为820 mg/l，海拔3 000 m为660 mg/l，海拔5 000 m为533 mg/l。我国大气中的氮含量东部地区高，西部地区低，青藏高原含量最少。

此外，有些有害气体，如一氧化碳（CO）、二氧化硫（SO_2）、二氧化氮（NO_2）等，对环境、农业都有害。如形成酸雨的主要有害气体SO_2，对农作物特别是蔬菜作物影响很大，在我国南方一般能造成减产5%～10%。对这些于农业有害的气体，除减少人为污染外，应做到无害化、资源化，为农业生产所利用。

六、农业气候资源的开发利用

世界各国农业气候资源利用的主要成就是在农业布局合理方面。美国的小麦带、玉米带、大豆带、棉花带是合理利用气候资源的代表。巴西在中南部发展大豆生产，开发和提高了气候资源利用的效率，而在其他方面的开发利用做得很少。我国的农业气候资源开发利用取得了多方面的经验和成就，使中国的农业气候资源开发利用在世界占有重要地位。

（一）利用农业气候规律，调整农业生产布局和结构

（1）利用农业气候条件与作物组合的适应规律改革种植制度　一个地区是否能多熟种植，主要取决于热量条件，中国华北平原地区历史上实行一年一熟或二年三熟制，通过对热量条件与作物要求的热量条件关系分析，≥0℃积温大于4 500℃·日，可发展二熟制，华北平原地区具备这种条件，现已形成冬小麦—夏玉米二熟制。长江流域热量条件≥0℃积温达5 300～7 000℃·日，在长江沿岸地区采用育苗移栽可以发展油—稻—稻或早熟麦—稻—稻三熟制，但双季稻有风险，在长江流域中南部可以发展安全的三熟制。种植制度改革的成功，使中国粮食总产量大幅度提高。

（2）利用长江三角洲农业气候规律调整农业布局和结构　长

江三角洲气候条件种二熟有余，种三熟不足，种麦—稻—稻三熟有风险，改为麦—瓜—稻为宜。此外，调整作物播种期和茬口，采用人工措施（日光温室、塑料大棚、地膜覆盖、夏季遮阳网等），可有效地利用气候资源，使农业生产达到优质、高产、高效。

(3)利用珠江三角洲和邻近地区气候规律发展农业生产　根据这一地区冬暖气候发展冬甘薯、冬大豆、冬玉米生产。通过对小麦生态适应性试验，确定了小麦气候适宜与不适宜的地区，气候资源得到了合理利用，使小麦生产趋于稳定。利用龙眼、荔枝花芽分化期怕低温、高温的规律，在北回归线附近找到了一条适宜气候种植带，所种龙眼和荔枝产量高、品质佳。根据杧果开花期怕低温阴雨的气候规律，在雷州半岛和粤西山区找到了适宜杧果生产的气候区，使高产优质杧果生产得到了发展。

(4)利用农业气候规律调整四川双季稻种植　四川盆地双季稻产量低于长江中下游地区，主要是因为双季晚稻生育期间重要生育阶段的平均气温比长江中、下游低1～3℃，10月上旬出现不利于抽穗、开花、灌浆的条件，生育期延后10～15日，晚稻产量低，对发展双季稻生产不利。后来根据气候资源和条件改革种植制度，改一旱二水为二旱一水，即改麦—稻—稻为麦—稻—薯或麦—稻—玉米，使农业生产获得了稳产高产。

(二)优势农业气候资源的开发利用

(1)利用新疆干热气候发展棉花生产　新疆塔里木盆地、吐鲁番盆地属干旱暖温带气候，棉花蕾铃期气温达25～30℃，是中国生产长绒棉的最佳气候条件。准噶尔盆地属干旱中温带气候，由于夏季温度高，棉花生产气候比同纬度东部地区优越得多。现已大面积发展棉花生产，使优势棉花气候得到充分利用。

(2)利用长江三峡优势气候发展脐橙生产　脐橙对气候条件要求严格，长江三峡秭归、奉节等地区脐橙花芽开放期、果实膨大期热量充足，降水适宜，脐橙产量、果汁与糖分含量都较高，现已建

成大面积脐橙生产基地。

(3)利用黄土高原优势气候发展苹果生产　黄土高原苹果果实生长至成熟期平均气温19～22℃,日较差10～13℃,海拔较高,7～8月太阳辐射强,秋季有适量的降水,所生产的苹果着色好,可溶性固形物含量高,糖酸比适中,风味浓,耐贮运,目前已成为中国重要苹果产区。

(4)利用东北地区南部优势气候发展板栗生产　板栗营养生长期开始、适宜、停止生长所需≥10℃积温分别为365℃·日、790℃·日、1 210℃·日,所需降水量(4～5月)分别为50、123、180 mm。花期光照(6月)不足180 h则板栗减产。根据这种气候条件分析,在辽宁南部的宽甸等地找到板栗优势气候地点,现已大面积种植。

(三)利用农业气候区划发展农业生产

(1)利用农林作物气候区划,调整作物生产布局　根据作物与气候条件之间的关系,对小麦作出适宜性区划,使中国小麦生产做到在黄河中、下游地区适当集中,在长江流域南部如江西适当收缩,使中国小麦的总产量得到明显增长。甘蔗生产在适宜气候区得到发展,不适宜气候区停止发展。其他作物气候区划也得到实际应用。

(2)利用地区性农业气候区划指导农业生产　全国各省区都开展了农业气候区划,对农、林、牧生产,各种作物生产按区划进行调整,取得显著经济效益。四川省渡口市做出立体农业气候区划,在气温高的1 500 m以下地带发展水旱三熟制和南亚热带作物生产,在气温较高的1 500～2 300 m的地带发展粮食作物一年二熟制和棕榈、板栗等生产,在气温较低的2 300～3 000 m地区发展粮食作物一年一熟制和林业生产,使农业气候资源得到了合理利用。

(3)利用地形气候区划,发展柑橘生产　根据湖南省衡山县地

形、低温条件，划分了柑橘安全区、轻冻区、中冻区、重冻区，用以指导柑橘生产，避免损失。

(四)根据气候灾害发生规律发展农业生产

江苏省扬州地区根据出现严重冻害的温度条件，停止发展柑橘生产。北京地区根据玉米“卡脖旱”的出现规律，调整山区玉米播种期，提高玉米收成。黑龙江根据冷害发生的规律，提早玉米播种期，使玉米避免冷害，产量明显增加。广东早稻生育期间常遇涝害，晚稻生育期间常遇寒露风，经采取措施，早稻生育期得以延长，晚稻插秧期予以提早，避免了涝害和寒露风害。

(五)开发利用冬暖气候资源

利用热带、亚热带冬暖气候发展冬菜瓜果生产，满足北方冬菜供应，减少能源消耗。利用热带和南亚热带冬暖气候加速种子加代繁育，使优良品种加速推广。

(六)利用地形气候资源发展农业生产

(1)利用地形气候，发展热带作物生产　中国热带属北热带，有寒害发生，南亚热带寒害更严重，根据地形气候特征和冷空气活动的地形规律，划分出冷空气难进易出、易进易出、难进难出、易进难出 4 种类型，选择难进易出型发展热带作物生产。

(2)利用山地逆温，发展橡胶生产　在我国西部和南部地区的山地有逆温层存在。在相对高度 100～400 m 处为稳定暖带，为最理想的植胶带；相对高度 400～500 m 处温度波动大，逆温不稳定、不明显，寒害较轻，可以作为植胶地段；相对高度大于 500 m 为植胶上限高度。在偏北的植胶区利用逆温取得了成功。在新疆伊宁地区，利用海拔高度 850～1 000 m 的坡地逆温种植苹果也取得成功。

(3)利用山区不同海拔高度，发展不同熟制的水稻生产　在福建，北纬 25°，海拔 600 m，积温＞5 000℃·日；北纬 27°，海拔400 m 以下，积温 4 500～5 000℃·日；北纬 25°，海拔 300 m 以下，积温＜

4 500℃·日，为暖地双季稻气候。北纬25°，海拔800 m以上；北纬26°，海拔600 m以上；北纬27°，海拔500 m以上，为凉地单季稻气候。采用不同熟制，水稻生产得到了有效发展。

(4)利用山地气候，发展反季节蔬菜生产　在南方因夏季高温，出现蔬菜淡季。在湖北利用五峰山地、浙江利用龙泉山地气温低的条件，种植反季节蔬菜，解决城市夏季蔬菜供应。在广东利用粤北山地与粤南平原气温差，在阳山县种植西洋菜、番茄等比平原地区晚1个月以上，改善了平原地区蔬菜供应，取得很高的经济效益。

(5)利用水体效应，发展柑橘生产　在上海长兴岛利用四周水体的调温作用，冬季平流型降温天气可比内陆地区气温高1～2℃，辐射型降温天气比内陆高4～5℃，因此利用水体的温度效应，在岛上种植柑橘成功。在浙江新安江水库、安徽宿松湖泊等利用水体效应种植柑橘都获得满意的效果。

(七)利用作物生态规律开发利用气候资源

在贵州、云南等地大面积种植春烟，夏季收获，收获后有1～2个月空季不能利用。根据小麦品种类型对夏播的不同反应，一些春性品种和弱冬性品种能适应夏季播种的规律，在烤烟种植区发展夏秋麦生产取得成功。在湖南中部地区，有三熟制稻茬麦和晚稻秧田前茬麦，种植晚熟小麦，播种期晚、产量低，改种早熟的弱冬性品种和弱春性品种，提早10～20日播种，可以充分利用光热资源，使小麦获得高产。

(八)利用农业技术开发利用气候资源

在我国各地，大面积利用地膜覆盖，改善农田气候，延长生长季节。在北方和西南地区的玉米地膜覆盖，北方晚茬麦、冷凉地区的春小麦地膜覆盖，在宁夏甜菜地膜覆盖，在山西小麦、棉花间套作地膜覆盖，都取得了充分利用气候资源提高作物产量的显著效果。

第三节　农业气候区划

1900年德国柯本开始发表世界气候分类法；美国于20世纪30年代提出农业区划。1937年前苏联谢良尼诺夫提出农业气候区划，1945年日本大后美保、吉良龟夫先后提出作物气候区划和总的农业气候区划，1948年美国桑斯威特提出气候区划方法，1952年阿根廷帕帕达克斯提出了世界农业气候区划。20世纪50年代以前以提出农业气候区划方案为主，进入20世纪60年代后，在以前农业气候区划的基础上，进行了合理的、农业意义更明确的区域划分。1964年莎士柯做出前苏联农业气候区划，1969年阿根廷帕斯卡尔提出了大豆气候区划，1972年戈尼茨别尔格修定谢良尼诺夫的世界农业气候区划。

中国1931年竺可桢发表了《中国气候区域论》，1936年涂长望提出中国气候区域划分，1946年、1949年卢鋈、陶诗言先后提出气候区划，1957年张宝堃提出更为明确的中国气候区划，1978年《中国气候图集》中做出了更完善的中国气候区划。在20世纪70年以前，中国做出的都是气候区划。1980年丘宝剑、卢其尧提出了中国农业气候区划试论，1988年以中央气象局为主多部门合作完成了中国农业气候区划、中国农林作物气候区划、中国牧区农业气候区划、中国种植制度气候区划等，1998年出版的《中国农业气候学》提出了一个世界农业气候带划分的方案，农业气候区划在我国得到了发展，农业气候区划在农业规划和农业生产中发挥了重要作用。

一、农业气候区划原则

农业气候区划是根据气候农业相似和分异的原理做出，即将农业气候条件和农业生产类型相同的划在一类，将不同的划开(表3－5)。由于农业气候条件有区域性、地方性特点，农业生产有农、

牧、林区域性，作物布局和结构有不同适应性和适宜性，因此农业气候区划有不同区域和不等级的划分。

二、农业气候区划方法

农业气候区划已形成了较成熟的方法，我国农业气候区划研究结果可以归纳如下：

（一）选定区划因子，确定区划指标

农业与气候之间的关系都反映在各种气候要素的作用上，有直接影响，有间接影响；有的影响明显，有的影响不大。在对农业产业影响的气候条件中，热量与水分的影响更为直接。在热量条件中用积温表示总热量，用平均气温和关键期平均气温、极值等表示农业气候界限条件，用不同界限温度期间的日数表示生长期长短等；水分条件用降水量、盈亏量、干燥度、土壤水分量等划分气候类型的界限；光照条件用太阳辐射量、日照时数、光周期等指标，这些多用于专业农业气候区划。气候灾害也作为不利影响因子在区划中占有重要地位，有旱、涝、低温冷害、冻害、干热风、风害等农业气候灾害区划。中国农业气候区划选用积温、最热月和最冷月气温、降水量、干燥度、灾害等为主要区划因子；中国作物气候区划多选用积温、气温（平均值和极值）、降水量、水分盈亏量、干燥度、光周期、日照时数等为区划因子。中国牧区气候区划选用降水量、干燥度、风沙、积温等为区划因子。不同的农业生产对象和内容与气候的关系不同，选用不同的因子。

确定区划指标是根据选用的农业气候区划因子定出反映农业与气候关系的指标，建立指标系统，确定区划的界限值。不同的区划方法、对象、种类有不同的指标，如采用聚类分析方法应是综合指标，采用生物气候学方法应用单项的温度条件或水分条件；区划的对象是农作物即可以是单项指标如温度或水分，也可以是多因子综合；如是灾害区划大多采用单项指标，也有如干热风采取温、

湿、风三要素指标。农业气候区划一般要求的是实质性指标量，因区划的对象多是农业生物体，其对气候条件的要求都是需有一定量的条件，如作物的水分条件是需水量，与其对应的是水分供给量，水分保证率等一类非实质性的指标只能作辅助指标。

(二)综合因子法和主导因子法

在自然环境下的农业生产受到多因子的整体影响，应采用多因子综合指标，综合不可能完全模拟出自然环境的因子组合，大多综合指标是所需因子的条件组合。地球上的农业气候不是均一的，同时农业生物体要求的生存条件和适宜条件是不同的，各种农业气候条件不是同等重要的，因此在大多数情况下只采用与农业关系最密切的要素，或采用起重要作用或决定性作用的要素作主导指标，其他次要作用的要素作辅助指标。如在温带、亚热带干旱条件下水分应是主导指标，在冷凉条件下温度是主导因子。如玉米冷害的主导影响因子是温度，小麦旱害的主导指标是水分。可见综合因子区划与主导因子区划方法是不相同的，不同的情况采用不同的方法。

(三)区域划分法和类型划分法

在农业气候区划中经常出现区域区划、类型区划或二者结合的农业气候区划。区域区划的分区必须在地域上是连续的区域，一般先划大的区域或带，再划地区和小区。类型区划是因为在一个大的地域内有各种不同的农业气候类型，或者因区划的对象是各种生态类型组成的，在分布上表现为不连续的区，这样划分的区属类型区划。在大型区划中(全球、全洲、全国)多是区域划分与类型划分相结合。如中国农业气候区划在农业气候大区、农业气候带是区域划分，第三级区划是类型与区域并存。

三、中国农业气候区划

(一)中国综合农业气候区划

中国幅员辽阔,地形复杂,农业气候条件差异很大,农业生产形式和内容各地都不相同,采用主导指标与辅助指标、区域划分与类型区划相结合,做出3级农业气候区划。第一级划分3大区,即东部季风农业气候大区、西北干旱农业气候大区和青藏高原农业气候大区。第二级划分农业气候带,东部季风农业气候大区划分为北温带(寒温带)、中温带、南温带(暖温带)、北亚热带、中亚热带、南亚热带、藏南亚热带、北热带、中热带、南热带;西北干旱农业气候大区划分为干旱中温带、干旱南温带;青藏高原农业气候大区划分为高原寒带、高原亚寒带、高原温带。第三级划分农业气候区,全国共划分出55个(表3-5、图3-4)。区划各级的意义不同,第一级主要将我国大的农业自然环境和大农业区域性的基本农业气候差异划分出来,显示出湿、干、高寒和农、牧、林等的相似与显著不同;第二级主要划分出农业气候带,反映热量条件的地带性特点、农业布局和结构的相似与差异的区域性特点;第三级主要划分出非地带性的各种农业气候类型,反映农业气候和农业生产的地区性特点。

(二)专业农业气候区划

专业农业气候区划是区划对象具体、针对性较强的区域划分。有农林作物气候区划、种植制度气候区划、畜牧业气候区划、林业气候区划、各种气候灾害区划等。这类区划指标要求具体,农业意义明确,区域特点显著,实用性较强。我国已完成了多种专业气候区划。农林作物气候区划方面做出了小麦、水稻、玉米、大豆、棉花、油菜、花生、茶、甘蔗、甜菜、苎菜、黄麻和红麻、烟、柑橘、梨、苹果、桃、葡萄、橡胶、蚕桑等20多种作物气候区划,区划各具特点,已在农业规划和农业生产、其他专业区划中应用。有种植制度气

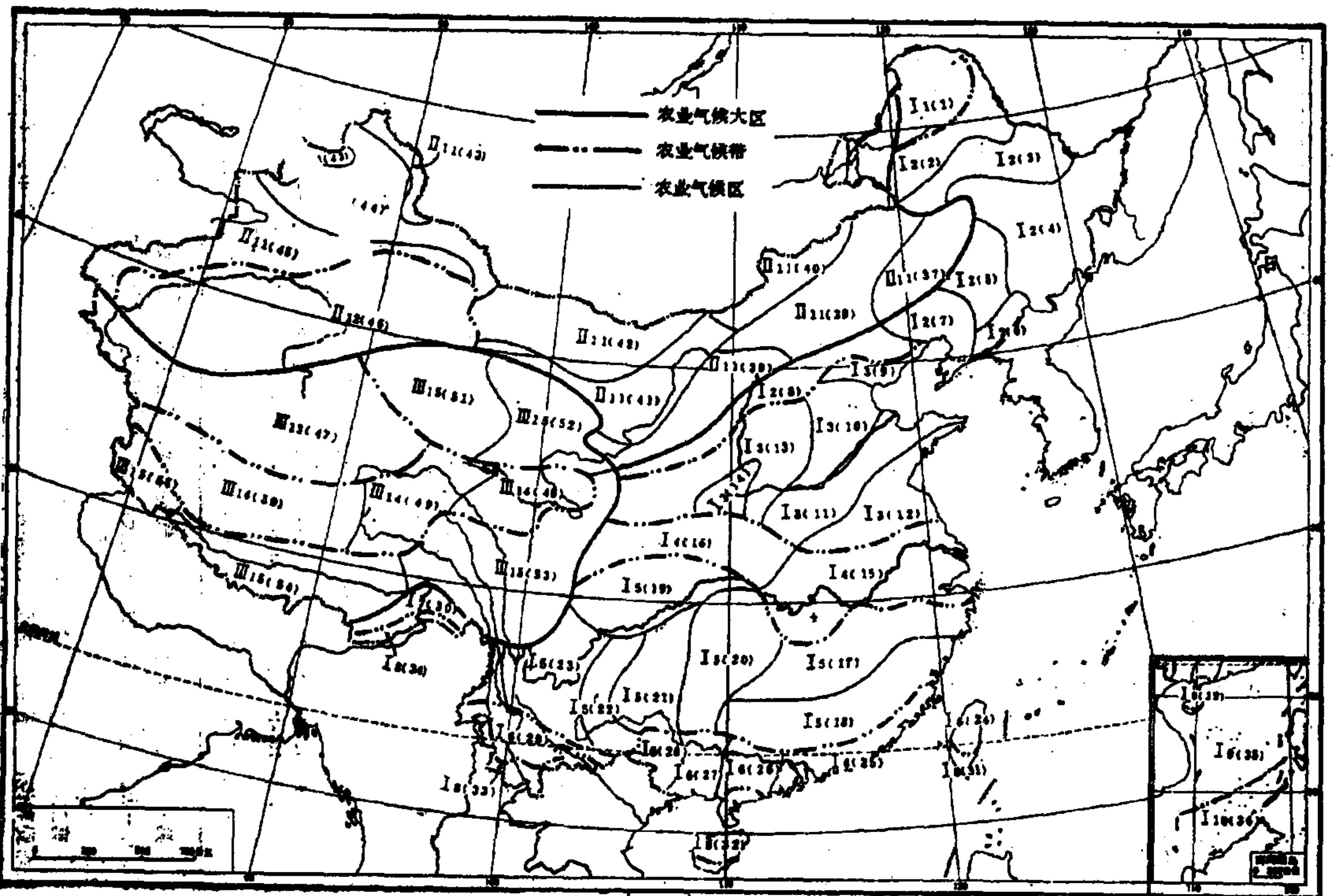


图 3-4 中国农业气候区划图（侯光良等 1993）

表 3－5 中国农业气候区划系统表

农业气候大区	农业气候带 名称	农业气候带 指标	农业气候区 区号	农业气候区 名称	农业气候区 指标				主要农业气候特征	农业特征
					≥0℃积温(℃)	最热月平均气温(℃)	最冷月平均气温(℃)			
Ⅰ东部季风农业气候大区(46.2%)	I_1 北温带(1.3%)	(1)≥0℃积温<2 100℃ (2)最热月平均气温<16℃ (3)最冷月平均气温<－30℃	I_1(1)	大兴安岭北部区(1.3%)	<2100	<16	<－30		冬严寒夏温凉、无霜期短、积雪期长、湿润	林业、一年一熟、特早熟作物、马铃薯、春小麦、燕麦
					≥0℃积温 ℃	年湿润度	年降水量(mm)			
	I_2 中温带(10.6%)	(1)≥0℃积温 2100～3900℃ (2)最热月平均气温 16～24℃ (3)最冷月平均气温－30～－10℃	I_2(2)	博克图—呼玛区(1.1%)	2100～2600	0.5～1.0	450～500		冬季严寒、积雪期长、无霜期短	林、牧、一年一熟、特早熟作物、春小麦、马铃薯
			I_2(3)	嫩江—小兴安岭区(2.0%)	2600～2800	0.5～1.0	450～600		冬寒夏凉、无霜期短、低温冷害、多大风	一年一熟、早熟作物、春小麦、早熟玉米、甜菜、大豆、林、牧
			I_2(4)	松花江—牡丹江区(2.8%)	2800～3200	0.5～1.0	400～700		冬季寒冷、低温冷害、多大风、西多春旱、东易秋涝	一年一熟、中熟作物、玉米、春小麦、大豆、甜菜、林、牧
			I_2(5)	松辽平原区(1.3%)	3200～3600	0.5～1.0	500～750		冬冷夏凉、低温冷害、大风多	一年一熟、晚熟作物、玉米、春小麦、大豆、高粱、水稻、甜菜、向日葵、牧、林
			I_2(6)	长白山区(0.6%)	2700～3400	>1.0	>800		冬冷夏温、湿润、低温冷害	林、一年一熟、中晚熟作物、春小麦、水稻、大豆、玉米
			I_2(7)	辽西—辽南区(0.8%)	3600～3900	0.5～1.0	500～800		温暖、半湿润、春旱	一年一熟、晚熟作物、玉米、春小麦、水稻、大豆、谷子、果、林
			I_2(8)	长城沿线区(2.0%)	日平均风速≥5m·s⁻¹的年日数小于50 d，≥0℃积温 3000～3900℃，年降水量 400～550 mm				温暖、半湿润、半干旱、多风沙、霜冻冰雹较多、春旱重	农牧过渡、一年一熟、玉米、谷子、防护林
					年水分供求差(mm)	4～6月水分供求差(mm)	年降水量(mm)	3～5月降水量(mm)		
	I_3 南温带(8.2%)	(1)年极端最低气温多年平均－22(西段－20)～－10℃ (2)≥0℃积温 3 900(西段3600)－5500℃(西段4 800℃) (3)负积温≥－650℃(西段≥－500℃	I_3(9)	北京—唐山—大连区(0.6%)	－200～－400	－200～－300	450～600	50～80	暖温、半湿润、春旱	二年三熟、小麦、玉米、果、林
			I_3(10)	黄－海平原区(1.3%)	－300～－400	－180～－220	400～600	60～130	春旱重、干热风、涝	二年三熟或一年二熟、旱作、小麦、棉花、玉米、苹果、梨、枣
			I_3(11)	黄河下游南部区(1.7%)	0～－200	0～－200	600～800	80～140	暖热、春旱、干热风、夏多雨	一年二熟、旱作、小麦、玉米、花生、林、粮间作、苹果、葡萄、烤烟
			I_3(12)	淮北－鲁东区(1.6%)	0～200	0～－150	700～1000	100～200	暖热、南多涝、北有春旱	一年二熟、水旱兼作、水稻、大豆
			I_3(13)	黄土高原区(2.4%)	－150～－300	－100～－250	400～600	60～130	暖温、春旱重	二年三熟或一年二熟小麦、旱粮、苹果
			I_3(14)	关中平原区(0.6%)	－200～－250	－100～－150	600～700	80～130	暖热、多秋雨	一年二熟或二年三熟、小麦、玉米、棉花、奶山羊

农业气候大区	农业气候带 名称	农业气候带 指标	农业气候区 区号	农业气候区 名称	农业气候区 指标			主要农业气候特征	农业特征
I 东部季风农业气候大区(46.2%)	I4 北亚热带(5.8%)	(1)年极端最低气温多年平均-10~5℃ (2)≥0℃积温5500(西段4800)~6100℃(西段5900℃) (3)最冷月平均气温0~4℃			3~5月湿润度		最热月平均气温(℃)		
			I4(15)	长江中、下游区(3.7%)	>1.0		>28	冬冷、夏热、生长期长、春、初夏多阴雨、伏旱、有渍涝	亚热带作物种植边缘区、一年二熟或三熟双季稻、麦、棉、油菜、桑蚕、竹渔
			I4(16)	汉水中、上游区(2.1%)	<1.0		<28	夏热、冬温和、山地气候多样、有洪涝、秋霜有害	亚热带经济林边缘区、一年二熟、稻麦、林、牧、野生生物保护区
	I5 中亚热带(13.9%)	(1)年极端最低气温多年平均-5~0℃ (2)≥0℃积温6100(西段5900)~7000℃(西段6500℃) (3)最冷月平均气温4~11℃			2~4月湿润度	7~8月湿润度	最热月平均气温(℃)		
			I5(17)	江南丘陵区(2.9%)	>3.0	<1.0	28~30	夏炎热、伏旱、春多阴雨、秋有寒露风	一年三熟或二熟、稻稻麦(油、绿肥)、苎麻、油茶、柑橘、渔、牧
			I5(18)	南岭-武夷山区(2.5%)	>3.0	>1.0	28~29	夏热冬冷、春雨多、秋有寒露风、山地气候多样	林(杉木)、果树、一年二熟或三熟、山区中季稻、牧
			I5(19)	四川盆地区(2.3%)	1.0		>26	夏热、冬暖、生长期长、夏秋、多雨、川东伏旱、日照少	一年三熟或二熟、稻麦(油)水旱作、蚕桑、柑橘、漆、生猪
			I5(20)	湘西-黔东区(2.1%)	1.5~3.0	>1.0	26~28	冬暖夏凉、春秋阴雨多、光照较少、多雹、山区气候多样	一年二熟、稻麦(油)玉米、茶叶、烤烟、杉、桐、漆树、牧
	I5 中亚热带(13.9%)	(1)年极端最低气温多年平均-5~0℃ (2)≥0℃积温6100(西段5900)~7000℃(西段6500℃) (3)最冷月平均气温4~11℃	I5(21)	黔中高原区(1.0%)	0.5~1.5		22~26	冬暖夏凉、秋多绵雨、寡照、多雹	一年二熟、水稻、玉米、油菜、烤烟、牧、林
			I5(22)	黔西-滇东高原区(1.5%)	0.2~0.5	1.8~2.2	20~23	冬冷、夏凉、北部光照较少、春旱、多暴雨	一年一熟、稻、玉米、小麦、杂粮、烤烟、茶、牧
			I5(23)	滇中-川西南高原区(1.7%)	<0.2	1.8~2.6		多暖夏凉、冬春旱较重、光照足、河谷干热	一年二熟、一季中稻、玉米、油菜、蚕豆、烤烟、茶、牧、林

农业气候大区	农业气候带		农业气候区					主要农业气候特征	农业特征
	名称	指标	区号	名称	指标				
					2~4月湿润度	2~4月降水量<200mm频率(%)	8~10月降水量<250mm频率(%)		
I 东部季风农业气候大区(46.2%)	I_6南亚热带(4.0%)	(1)年极端最低气温多年平均0~5℃ (2)≥0℃积温7000(西段6500)~8200℃(西段7500) (3)年极端最低气温≤-3℃出现频率<5% (4)最冷月平均气温11~15℃	$I_6(24)$	台北-台中区(0.3%)	0.6~2.1			冬暖、夏热、雨量丰富、台北冬雨多、山区气候垂直变化大、多台风	一年三熟、水稻、甘蔗、茶、南亚热带果树、森林、渔
			$I_6(25)$	粤中南-闽南区(1.0%)	1.0~1.8	25~40	<20	雨热同季时间长、冬暖、春旱、洪涝、台风、寒露风	一年三熟、双季稻、甘蔗、蚕桑、渔、禽、冬蔬菜、龙眼、荔枝、香蕉、柑橘
			$I_6(26)$	粤西-桂东南区(0.6%)	1.4~2.4	10~25	<10	雨热同季时间长、冬暖、寒露风	一年三熟、双季稻、甘蔗、南亚热带果木、热作过渡区、冬蔬菜、冬烟
			$I_6(27)$	桂中南区(0.6%)	0.9~1.2	25~60	10~20	夏高温多雨、冬季热作偶有寒害、春旱	一年三熟、稻、玉米、甘蔗、花生、冬蔬菜、柑橘、龙眼、荔枝、林、渔
			$I_6(28)$	桂西南区(0.6%)	0.4~0.9	61~90	<10	光热丰富、冬暖、春旱	一年三熟、玉米、稻、甘蔗、南亚热带果树、特种珍贵林、牧
			$I_6(29)$	滇南高原区(0.9%)	0.1~0.3			冬春干旱、夏湿、冬暖、寒潮、影响较小	一年二熟、中稻、玉米、杂粮、甘蔗、茶、紫胶、林、橡胶树
	I_7藏南亚热带(1.2%)	(1)≥0℃积温4000~6000℃	$I_7(30)$	藏南-滇西北区(1.2%)	≥0℃积温4000~6000℃,年降水量1000~2400mm			气候垂直变化大,河谷干热,高山寒冷、湿润	立体农业明显、一年二熟、林、牧
	I_8北热带(1.1%)	(1)年极端最低气温多年平均5~10℃ (2)≥0℃积温8200(西段7500)~9000℃ (3)年极端最低气温<0℃出现频率<3% (4)最冷月平均气温15~19℃			2~4月湿润度				
			$I_8(31)$	台南区(0.1%)	0.2~0.7			热量丰富、海洋性气候、冬半年水分不足、多台风	一年三熟、稻、甘蔗、香蕉、菠萝
			$I_8(32)$	琼雷区(0.4%)	0.5~1.1			雨热同季时间长、春旱重、台风多、典型热作偶有寒害	一年三熟(橡胶、胡椒、椰子)、稻、蕉
			$I_8(33)$	西双版纳-河口区(0.5%)	0.1~0.3(河口0.9)			冬干暖、夏湿热、寒害少、常风小	全年可种喜温作物、稻、杂粮、热作水果、大叶茶、蔗、热带林木
			$I_8(34)$	藏东南边境区(0.1%)	≥0℃积温≥7300℃,最冷月平均气温10~13℃,最热月平均气温22~26℃,年降水量3000~5500mm			湿热多雨、暴雨多	热带雨林、一年三熟、稻、牧

农业气候大区	农业气候带 名称	农业气候带 指标	农业气候区 区号	农业气候区 名称	农业气候区 指标	主要农业气候特征	农业特征
					≥℃积温(℃) / 最冷月平均气温(℃) / 年降水量(mm)		
Ⅰ东部季风农业气候大区(46.2%)	$Ⅰ_9$中热带(0.1%)	(1)≥0℃积温9000~10000℃ (2)最冷月平均气温19~25℃	$Ⅰ_9$(35)	琼南-西、中、东沙群岛(0.1%)	9000~10000 / 19~25 / 1000~1600	热量丰富、水分充足、无寒害、台风	全年可种喜温作物，水稻可三作，南繁育种主产橡胶、可可、椰子等热作、渔业
	$Ⅰ_{10}$南热带	(1)≥0℃积温>10000℃ (2)最冷月平均>25℃	$Ⅰ_{10}$(36)	南沙群岛区	>1000 / >25	终年湿热	渔业及其他海产、各种热作能生长
					年降水量(mm) / ≥0℃积温(℃) / 日平均风速≥5米/秒的年日数(天) / 年降水量≥400mm频率(%)		
Ⅱ西北干旱农业气候大区(28.2%)	$Ⅱ_{11}$干旱中温带(19.8%)	(1)≥0℃积温2100~4000℃	$Ⅱ_{11}$(37)	科尔沁区(1.7%)	350~400 / 3000~4000℃ / 65~110 / 30~50	温暖、半干旱、风资源丰富、风沙、冰雹	农牧过渡区、防护林、一年一熟、玉米、谷子
			$Ⅱ_{11}$(38)	呼伦贝尔-锡林格勒高原区(3.2%)	250~400 / <3000 / 80~140 / 10~40	冬寒夏凉、半干旱、风沙、白灾	农牧过渡或以牧为主、一年一熟、马铃薯、莜麦、春小麦
	$Ⅱ_{11}$干旱中温带(19.8%)	(1)≥0℃积温2400~4000℃	$Ⅱ_{11}$(39)	东胜-兰州区(1.7%)	250~400 / 3000~4000 / 40~80	温暖、半干旱、风沙大	一年一熟、前套水浇地小麦、玉米、甜菜、旱地杂粮、瓜、牧
			$Ⅱ_{11}$(40)	二连区(1.4%)	100~250 / / 100~150	温暖、干旱、风沙、风资源丰富	牧、无灌溉无种植业
			$Ⅱ_{11}$(41)	河套-河西区(2.5%)	100~250 / 3000~4000 / 30~40	温暖、干旱、风沙、干热风	灌溉农业、一年一熟、小麦、玉米、甜菜、稻、牧(羊、骆驼)
			$Ⅱ_{11}$(42)	阿拉善高原区(2.7%)	40~100 / 3000~4000 / >100	冬寒夏酷热、温暖、干旱、风沙重、温差大、太阳辐射强	荒漠、牧、无灌溉无种植业
			$Ⅱ_{11}$(43)	阿勒泰-塔城区(0.8%)	150~500 / <3000	温凉、干旱、半干旱、多白灾	牧、一年一熟、春小麦、马铃薯、林
			$Ⅱ_{11}$(44)	准噶尔盆地区(2.8%)	100~250 / 3000~4000	温暖、干旱、干热风	灌溉农业、一年一熟、小麦、棉花、玉米、杂粮、瓜果、牧、长绒棉
			$Ⅱ_{11}$(45)	天山区(3.0%)	100~1000 / <3000	高山冰川、多雨雪、伊犁河谷温暖	林、牧、一年一熟、河谷玉米、小麦、果树

农业气候大区	农业气候带 名称	农业气候带 指标	农业气候区 区号	农业气候区 名称	农业气候区 指标					主要农业气候特征	农业特征
	II$_{12}$干旱南温带(8.4%)	(1)≥0℃积温 4000～5700℃	II$_{12}$(46)	塔里木－哈密盆地区(8.4%)	<100　4000～5700					夏酷热、冬严寒、光照充足、干旱、风沙	荒漠戈壁、灌溉农业、一年二熟、瓜果(葡萄、哈密瓜)长绒棉、牧
III青藏高寒农业气候大区(25.6%)	III$_{13}$高原寒带(6.2%)	(1)≥℃积温<500℃ (2)最热月平均气温<6℃	III$_{13}$(47)	昆仑山－北羌塘高原区(6.2%)	≥0℃积温(℃)	最热月平均气温(℃)	最热月极端最低气温(℃)	年降水量(mm)	年湿润度	高寒、干旱、大风、光照强	荒漠、农业很少
					<500	<6	－18～－8	30～300	<0.2		
	III$_{14}$高原亚寒带(6.8%)	(1)≥0℃积温 500～1500℃ (2)最热月平均气温 6～10℃	III$_{14}$(48)	东青南高原区(1.8%)	<1700	6～12	<－2	500～800	≥1.0	高寒、湿润、多冰雹、冬春雪灾重	牧、河谷有农业
			III$_{14}$(49)	西青南高原区(2.1%)	<1500	6～10	<－3	360～600	<1.0	高寒、半湿润、冰雹、大风	牧
			III$_{14}$(50)	南羌塘高原区(2.9%)	1000～1500	6～10	－8～－3	60～300	<0.6	高寒、光能丰富、半干旱、干旱、大风、多冰雹	牧
	III$_{15}$高原温带(12.6%)	(1)≥0℃积温 1500～3000℃ (2)最热月平均气温 10～18℃	III$_{15}$(51)	柴达木盆地区(2.7%)	1800～2600	13～18	>－2	18～180	<0.3	夏暖冬寒、光能丰富、干旱、风沙	灌溉农业、一年一熟、春小麦、马铃薯、牧
			III$_{15}$(52)	青海湖盆地－祁连山区(1.7%)	<3000	10～18	－5～2	200～600	>0.3	冬冷夏凉、半干旱、干旱、冰雹	农牧过渡、祁连山林牧、一年一熟、春小麦、油菜
			III$_{15}$(53)	川西－藏东高原区(4.2%)	1700～3500	12～18	>－2	400～900	>0.6	温凉、气候垂直变化大	林、牧、一年熟、喜凉作物
			III$_{15}$(54)	藏南高原－喜马拉雅山区(2.9%)	<3100	10～16	<2	300～700	>0.3	温凉、气候垂直变化大、光能丰富、冬春干旱、冰雹	牧、河谷农、牧、一年一熟、喜凉、作物
			III$_{15}$(55)	藏西狮泉河区(1.1%)	1500～2000	13～14	－2～2	60～170	<0.2	温和、干旱、光能丰富、多大风	牧、一年一熟、青稞

候区划针对我国熟制气候进行了分区,为种植制度的调整提供了基本依据;牧区畜牧气候区划对我国草原、各种家畜进行区划,为牧区畜牧业发展提供了重要依据;各种气候灾害区划为减灾提供了依据。

我国农业气候区划无论在方法论方面,还是在具体区划结果以及实用性方面都是世界少有的,反映了20世纪80~90年代的世界农业气候研究水平。

第四节 农业气候的生产潜力

随着农作物光合作用的研究,太阳辐射能转化为农产品效率的研究也相继展开。早期的研究发现作物光能利用率很低,除作物本身的转化效率低外,还有多种限制因素。在自然环境中气候就是影响太阳光能利用效率的重要因素之一。我国于1958年后汤佩松、殷宏章等研究作物群体光合生产潜力问题;1964年竺可桢探讨中国粮食的生产潜力,开始分析气候要素对粮食产量的影响,指出光、温、水三者的重要作用。进入70年代黄秉维提出一个光合潜力的计算方法,得出将太阳辐射量以系数0.214可以算出某地的光合产量。此后我国许多学者开始探讨气候生产潜力问题,邓根云提出光温生产潜力,指温度对光合生产潜力的影响。中国农业科学院农业气候组、龙斯玉研究了水分对生产潜力的作用,分别提出用实际需水量和最大蒸散量计算作物气候生产潜力。为了使气候生产潜力的计算更符合作物生育特征的规律,李继田提出叶面积系数订正法。有人考虑土壤肥力的作用,提出气候—土壤生产潜力的计算方法。

影响作物生产潜力的因子很多,而影响的关系也很复杂,气候生产潜力的计算模式不可能完全模拟出作物气候产量。有些计算中出现过实际高产记录比模式计算结果要高。但在大多数情况

下，气候生产潜力的计算给农业生产指出了前景，找出了产量低的障碍因子，对于探索增产途径和措施是十分有用的。

我国在气候生产潜力的研究方面进展很大，从国内外的光合潜力发展到光温、光温水气候生产潜力的研究，使这一领域的研究结果比较接近实际，因此得到了广泛的应用。

一、光能生产潜力

作物光能生产潜力指外界条件(温、水、土、肥、农业技术等)保持最适状态时由太阳辐射转化的作物最大产量。

$$Y(Q)=K\sum Q \qquad (3-5)$$

式中 Y 为光能生产潜力；Q 为太阳辐射量；K 为作物光能转化系数。

用式(3-5)计算的光能生产潜力是一个地区自然光照条件下作物的最高产量，可以根据光能利用率的上限值或光合作用的量子效率估算。

侯光良用下式计算我国光能生产潜力 $Y(Q)$：

$$\begin{aligned}Y(Q) &= \sum Q\times 0.49\times 0.83\frac{L_i}{L_0}(1-0.10)\\&\quad(1-0.00)\times 0.224(1-0.30)\\&\quad\times(1-0.14)^{-1}\times(1.78\times 10^7)^{-1}\\&=0.37\times 10^{-8}\sum Q\frac{L_i}{L_0}(\mathrm{kg/m^2})\\&=37.00\times 10^{-6}\sum Q\frac{L_i}{L_0}(\mathrm{kg/hm^2}) \qquad (3-6)\end{aligned}$$

式中 L_0 为最大叶面积系数；L_i 为某一时段的叶面积系数；0.49 为生理辐射值；0.83 为绿色叶面积反射率；0.10 为非光合器官无效吸收率；0.00 为光饱和限制率；0.224 为量子效率；0.30 为吸收的耗损率；0.14 为有机物含水率；$(1.78\times10^7)^{-1}$为单位换算系数。

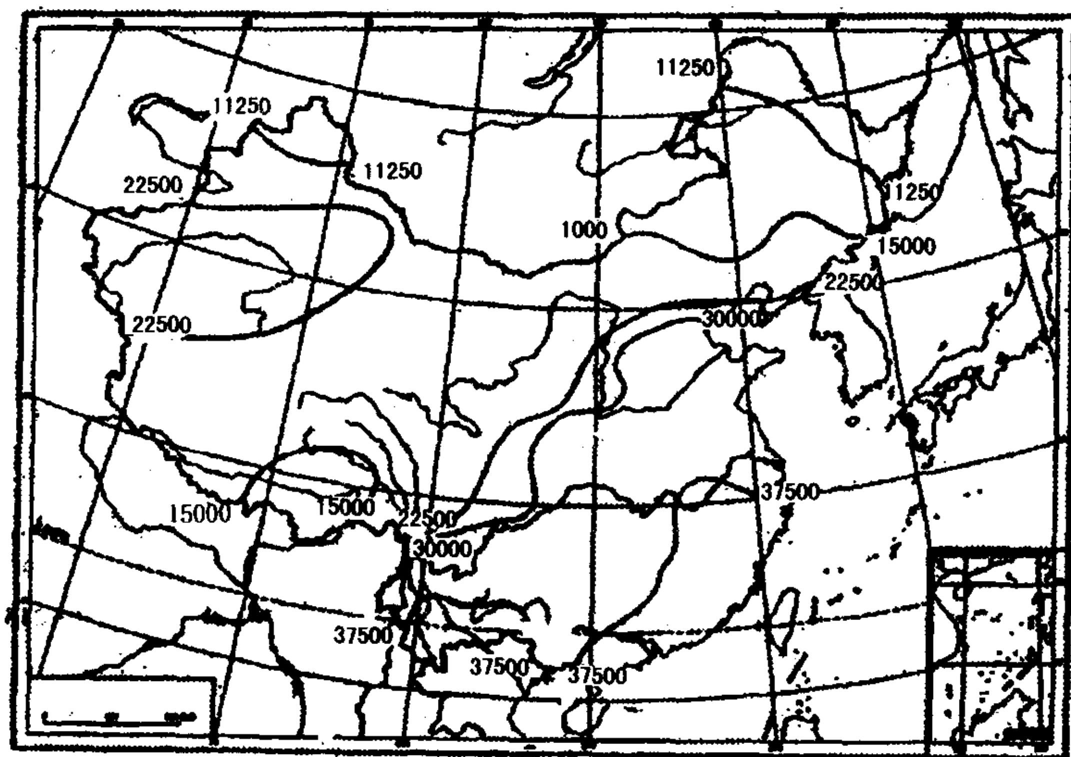


图 3-5　中国光能生产潜力分布(单位:kg/hm²)
(李世奎等　1988)

我国全年作物生长期光能生产潜力分布(图 3-5)由北向南增加,东北地区北部、新疆北部为 11 250 kg/hm²,东北地区中部和南部、内蒙古、陕西中北部、宁夏、甘肃、青藏高原大部、新疆大部为 11 250～22 500 kg/hm²,黄河流域中下游地区、长江中下游北部、云贵高原大部、广西和湖南西部为 22 500～37 500 kg/hm²,四川盆地西部为 22 500～30 000 kg/hm²,江西、华南地区、云南南部为 ≥37 500 kg/hm²。

二、光温生产潜力

光温生产潜力指水分、土壤状况、肥力、农业技术处于最适状态下,由光温条件所能生产的最大产量。

由于地理上不同地区温度不同，温度与作物生长发育、产量形成的最适温度之间的协调性不同，$Y(Q)$受到温度条件的制约，用下式计算光温生产潜力。

$$Y(QT) = Y(Q) \cdot f(T) \tag{3-7}$$

式中　$Y(QT)$为光温生产潜力；$Y(Q)$为光合生产潜力；$f(T)$为温度系数。

光温生产潜力估算中的温度(T)是作为修正函数来处理的，采用下式计算$f(T)$。

$$f(T) = \begin{cases} 0.027 - 0.162 & 6℃ \leqslant T < 21℃ \\ 0.086T - 1.41 & 21℃ \leqslant T < 28℃ \\ 1.00 & 28℃ \leqslant T < 32℃ \\ -0.083T + 3.67 & 32℃ \leqslant T < 44℃ \\ 0 & T < 6℃ \text{ 及 } T \geqslant 44℃ \end{cases}$$

据此得到光温生产潜力估算公式：

$$Y(QT) = 37.0 \times 10^{-6} \sum Q \frac{L_i}{L_0} f(T)(\text{kg/hm}^2) \tag{3-8}$$

作物的光化反应遵循范托夫定律，即温度每增高 10℃，光化反应速度增加 1 倍。

$f(T)$在一般情况下，温度 0～30℃之间生物干物质积累随温度的增高而增加，喜凉作物取 0～28℃计算，喜温作物取 0～32℃计算。

我国作物生长期间光温生产潜力的分布受≥0℃积温和年平均气温的影响，由北向南增加，即随≥0℃期间的持续日数增多而增加。东北地区、内蒙古、西北大部分地区、青藏高原南部光温生产潜力为 11 250～15 000 kg/hm^2，黄土高原南部、黄河流域中下游地区、长江流域中下游地区北部、四川盆地，云贵高原北部为 15 000～26 250 kg/hm^2，长江流域南部、贵州南部、云南中部为 26 250～30 000 kg/hm^2，华南地区为≥30 000 kg/hm^2，青藏高原大部

分为 3 750～11 250 kg/hm^2。

三、气候(光、温、水)生产潜力

气候生产潜力即光、温、水生产潜力，是指在自然条件下光、温、降水条件所能生产的作物最大产量。由于水分在作物生产中的重要作用，因此在估算作物生产潜力时必须充分考虑水分条件。作物水分状况我国有两种考虑，一种考虑用实际蒸散量(水分充分条件下)与最大蒸散量(水分不充分条件下)之比，估算气候生产潜力；另一种是用降水量(由试验得到的作物蒸散量)与作物需水量之比进行估算。两种方法估算的结果趋于一致。

$$Y(Q,T,W) - Y(Q)\cdot f(T)\cdot f(W) \qquad (3-9)$$

式中　$Y(Q,T,W)$为气候生产潜力；$f(T)$为温度修订函数；$f(W)$为水分修订函数。

气候生产潜力估算中的水分条件亦是作修正函数处理的，在一般条件下水分增加而生产潜力增大，采用下式计算 $f(W)$。

$$f(W)=\begin{cases}\dfrac{(1-C)R}{ET_m} & 0<(1-C)R<ET_m\\ 1 & (1-c)R\geqslant ET_m\end{cases}$$

式中　ET_m为最大蒸散量；R 为降水量；C 为从地表和渗入地下的流出量对降水量的比例系数，取 0.20。

据此得到作物气候生产潜力估算公式：

$$Y(Q,T,W) = 37.0\times10^{-6}\sum Q\frac{L_i}{L_0}f(T)\frac{(1-C)R}{ET_m}(kg/hm^2) \qquad (3-10)$$

据此式计算我国的气候(光、温、水)生产潜力。

图 3－6 和图 3－7 是中国光温生产潜力和气候生产潜力的分布示意图。

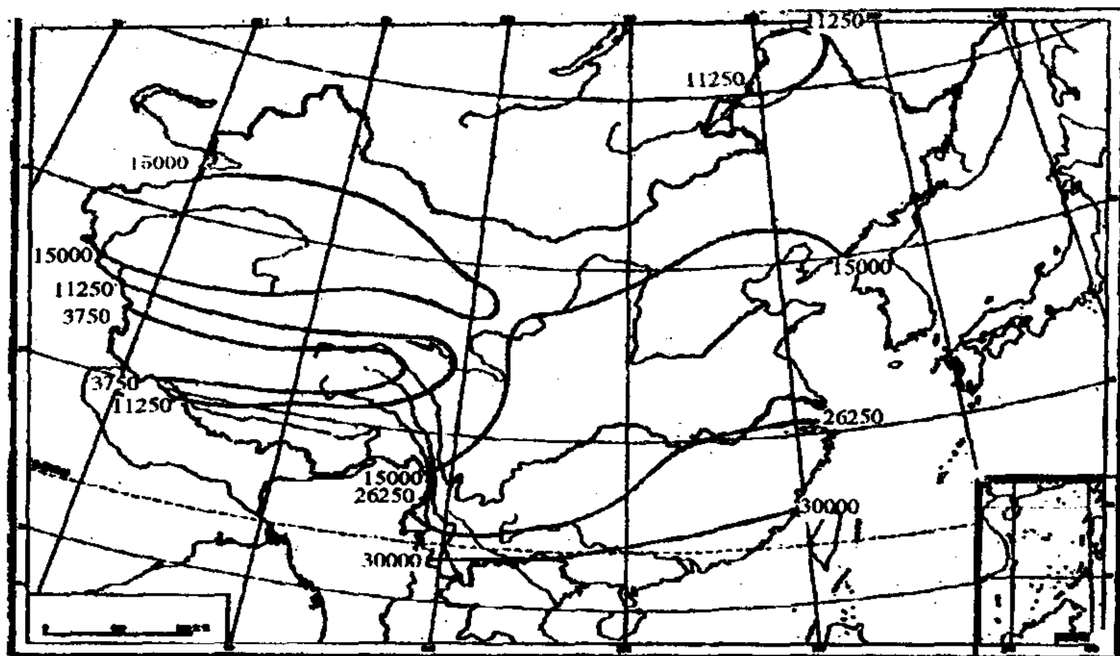


图 3－6　中国光温生产潜力分布简图(单位:kg/hm²)(李世奎等　1988)

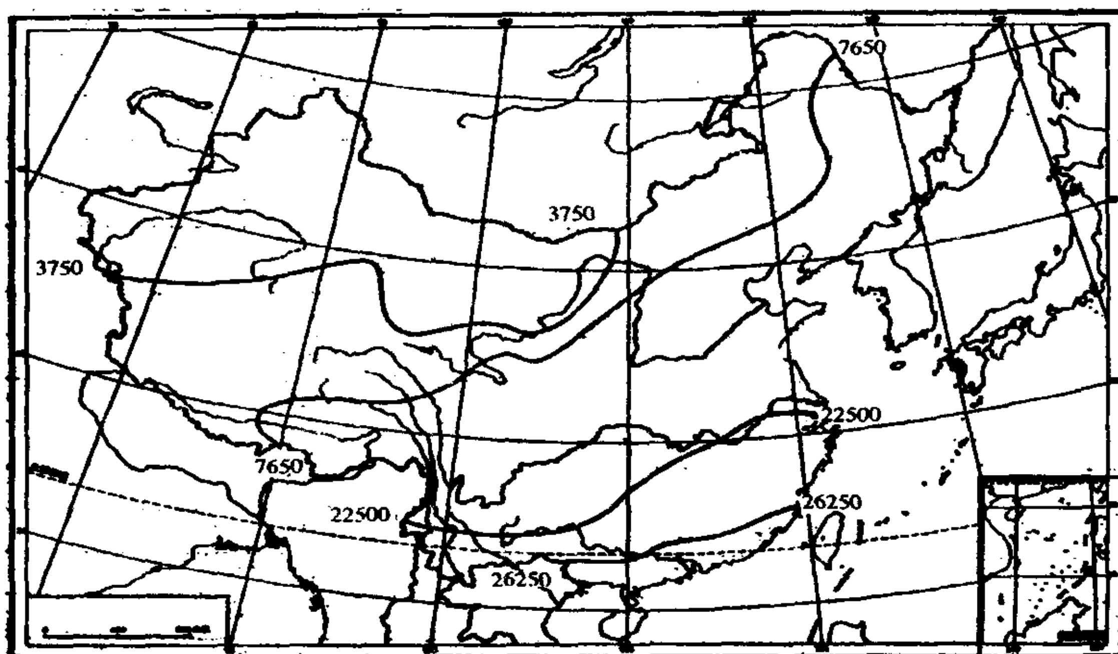


图 3－7　中国气候生产潜力分布简图(单位:kg/hm²)(李世奎等　1988)

我国作物生长期间气候生产潜力的分布受降水量和≥0℃期间的持续日数的影响，表现为北部少，南部多。新疆、甘肃、青海北部、宁夏为<3 750 kg/hm^2，东北地区北部、内蒙古、黄土高原北部、青藏高原大部为3 750～7 500 kg/hm^2，东北地区中南部、黄河流域中下游、长江中下游北部、四川盆地、云贵高原北部、青藏高原南部为7 500～22 500 kg/hm^2，长江流域中、下游南部、广西北部、云贵高原南部22 500 kg/hm^2，华南地区≥26 250 kg/hm^2。

总的看来，我国气候生产潜力很大，20世纪90年代中期的全国粮食作物产量为4 000～4 500 kg/hm^2，约只有全国气候生产潜力的1/3。东部季风区光温水配合较好，农业气候生产潜力易于发挥，但利用水平还不高。西北地区水分限制了光温生产潜力资源的利用，青藏高原温度限制了光能生产潜力资源的利用。从农业气候生产潜力看到农业生产的前景，从现实生产力与气候生产潜力的差值，可以找到障碍因子，明确需解决的重大农业气候问题。

第五节 气候变化与农业

在自然条件下农作物产量的一个基本特征是不稳定性，年际间有波动，究其原因，其与气候异常变化密切相关。因此气候变化历来都为人们所关注。气候变化一方面是由气候和生物地球化学循环两大系统的相互作用引起的；另一方面是由人类活动的影响造成的。气候变化对农业生产也相应地存在两个方面的影响，一方面是气候变化的影响，使农业可在年际间、10年、百年、千年的尺度上波动和调整；另一方面是人类活动引起的温室效应造成对农业的影响，这就是当今全球变化的农业问题。从近期的农业生产状况来看，我国的农业生产在气候波动中发展。20世纪50年代全国粮食总产量平均为17 292.0万t，60年代平均为19 513.0

万 t,70 年代平均为 28 418.0 万 t,80 年代平均为 39 150.2 万 t,90 年代的前 6 年平均为 46 099.4 万 t。

但是年际波动很大,从 1987～1996 的 10 年中年际波动为 -2.6%～9.0%,波动的原因主要是气候的波动所致。

一、历史时期气候变化与农业

讨论气候变化与农业的关系,主要应从农耕时代开始,重点讨论历史时期的气候变化与农业的关系。竺可桢于 70 年代发表的《中国近 5 000 年来气候变迁的初步研究》将历史时期的气候变化划分为考古时期(约公元前 30000～前 1100)、物候时期(公元前 1100～公元 1400)、方志时期(公元 1400～1900)和仪器观测时期(1900～)。

(一)考古时期

在距今七八千年前至公元前 1000 年,继末次冰期后,地球逐渐变暖,北半球大部分地区出现温暖湿润气候,被称为“气候适宜期”。关于我国从渔猎时代进入农耕时代和从火耕进入骨木耜耕的时期是否与适宜气候时期有联系的问题,从近几十年考古新发现证明,这时期初期农耕已经出现,从浙江余姚河姆渡考古和桐乡罗家角遗址发现,距今 6 000～7 000 年左右已有栽培稻粒、茎叶和碳化稻粒(籼、粳稻)。北方裴李岗、磁山、仰韶等地都发现约公元前 6000～前 3000 年的石镰、粟米,以农业为主,渔猎为辅,饲养猪、狗等家禽。在新石器时代,人类抗拒自然灾害的能力很低,依赖天时的因素很大,农业比其渔猎更需要较稳定较适宜的气候。这说明“气候适宜期”对我国早期农业的出现和发展有十分重要的作用。此外古文化中有许多关于农业的传说,如神农传用耒耜,教民农业生产,曾尝百草,发现药材,始有医药。黄帝时的嫘祖教民植桑养蚕等,都是出现在气候适宜期,可见气候与早期农业的形成和发展有着密切的关系。

(二)物候时期(公元前 1100～公元 1400)

距今约 3 000 年前,气候迅速转冷,进入一个较严寒的时期,到春秋时代(公元前 770～前 481)又暖和起来,到东汉时气候转冷,至三国、南北朝时平均气温较现代低 2～4℃。公元 589～907 年隋唐时期气候转暖,11 世纪气候变冷。春秋战国至西汉时期我国农业得到迅速发展,铁器出现,使农业生产水平普遍提高,精耕细作始于此期。二十四节气、七十二候就是这一时期形成和应用的,以物候指示农耕的方法得到发展。东汉至南北朝,从北魏《齐民要术》关于霜冻发生规律、熏烟防霜和抗旱保墒技术的研究可以推论,这一转冷时期的灾害较多,农业生产处于相对停滞的阶段。隋唐时期我国封建经济全面高涨,南方农业生产发展尤为迅速,耕作制度的多熟种植在唐有发展。

(三)方志时期(公元 1400～1900)

公元 14 世纪后气候转冷,17 世纪前后更明显,从长江流域双季稻的兴衰可见与气候暖冷有联系,唐代扬州已有双季稻栽培。宋代因气候转冷,扬州一带的双季稻几乎绝迹。明代 15 世纪后期双季稻又兴起,17 世纪中叶气候转冷,双季稻栽培停止,18 世纪气候变暖,清雍正时期双季稻又发展起来,19 世纪气候进一步转冷,双季稻再次绝迹。

从历史时期的气候变化来看,中国农业生产的发展深受气候变化的影响,气候温暖湿润时期,农业生产有明显的发展,寒冷时期农业生产的发展受到显著影响。

(四)近百年来气候变化与农业

从 19 世纪末开始中国大陆年平均和各季平均气温总的呈上升的趋势。至 1940 年前上升趋势更明显,1940 年后进入一个相对冷期,70 年代气温开始回升。80 年代气温与 50 年代相比,总的趋势,大约北方升温,南方降温,冬季增温,夏季一般降温或增温幅度很小(图 3－8)。近百年来降水变化为 1910～1919 年全国气候

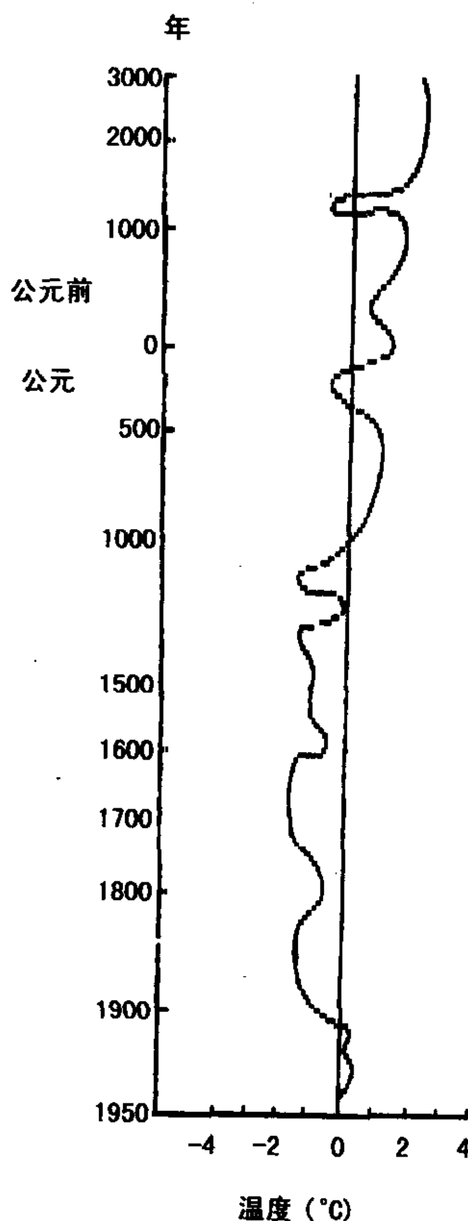


图 3-8 近 5 000 年来中国东半部温度变化

较湿，1920～1939 年气候干，1950～1959 年气候湿，1960～1979 年气候干，1980～1989 年气候湿。总的情况有变干的趋势。近几十年来我国的粮食生产随着技术的提高总的趋势是增产的，但有明显的波动，从 1949～1995 年间的全国粮食总产量，当年产量比上一年减产的年份中有 1959，1960，1968，1979，1977，1980，1985，1988，1991，1994 年等，这些年份都是因气候异常，粮田受灾和成灾面积大于上一年的受灾面积和成灾面积所致。而当年产量比上一年增产 8% 以上的年份有 1952，1955，1962，1964，1966，1970，1979，1983，1990，1995 年，这些年份受灾和成灾面积都比上一年减少，其中只有 1983 年受灾和成灾面积略比上一年增加，但仍属少灾年份。40 年来粮食产量总的趋势增加，与 60 年代后变暖趋势较一致，但从全国粮食产量的减产年和高增产年出现年代来看，并未因为增温趋势和降水量减少趋势而出现相应的趋势，增产年与减产年都与当年的气候条件有关。如 1985 年比上一

年减产了7.4%，江南地区主要是降水量偏少20%～30%，华北地区暴雨成灾，东北、西南、华南大部和华北部分地区气温偏低0.5～1.0℃，旱涝面积大。1990年比上年增产9.0%，全国温度增高0.5～2.5℃，降水量北方大部比多年平均增加25%以上，部分地区达50%，南方增加25%以下，受灾面积小。

总之，近几十年气候变化和气候异常影响了农业生产的稳定性。

二、温室效应与农业

(一)温室气体增加与气候变化

通常情况下，太阳辐射的短波部分可以透过大气而被地面吸收，对地面的长波辐射能够被大气吸收，使大气下层的温度增高，形成温室效应。大气中的CO_2，CH_4，O_3气体含量变化能改变大气的物理状况，增大温室效应的作用。根据对冰岩芯气泡中和树年轮中碳同位素分析结果，工业革命前(18世纪中叶)，大气中的CO_2含量为$280 \pm 10 \times 10^{-6}$。19世纪中叶$CO_2$含量水平在$285 \times 10^{-6} \sim 305 \times 10^{-6}$之间，至1990年增加到$350 \times 10^{-6}$。1958～1987年的30年间大气中的$CO_2$含量增加了10%，最近10年每年大气中$CO_2$含量平均增加$1.5 \times 10^{-6}$，预计至21世纪中叶大气中的$CO_2$含量将倍增，达到$560 \times 10^{-6}$。这与燃烧大量化石燃料和森林砍伐有关。全球温度将增高2.0℃。从20世纪80年代开始温暖年增加，气候变暖主要在冬季，中国大陆1951～1991年夏季属正常状态，而冬季温度增高约0.8℃。国际上采用多种大气环流模型(GGM)对未来气候变化进行评估，由IPCC WGI给出模拟结果，当大气中CO_2倍增时，地面温度将增高1.5～4.5℃，最佳估计为2.5℃，后又修订为1.0～3.5℃。中国应用国外多种模式进行模拟的结果，采用2.0～5.2℃。我国的一些重要著作如《中国科技蓝皮书(5)·气候》、《中国的全球变化预研究》中作了较慎重的

估计，前者估计，假定温室气体按目前趋势排放，到2050年气温增高2℃左右；后者估计，北半球纬度地区纬圈平均升温1.5℃左右。在《CO_2、气候变化与农业》，一书中计算了气候变暖 对中国年蒸散量的影响，得出年平均气温增高1℃，年蒸散量增加27～40 mm。至2050年气温增高2℃时，年蒸散量增加54～80 mm。许多研究都指出气候变化是很复杂的科学问题，无论是用动力学方法，还是统计学方法，气候变化的预测目前都处在试验研究阶段。由于气候变化的不确定性，各种预测还会变动。

甲烷(CH_4)是一种温室气体，主要由稻田、反刍动物、沼泽地释放和生物体燃烧而排放入大气。据南极冰芯成分分析，距今200年前，CH_4含量稳定在0.75×10^{-6}～0.80×10^{-6}。公元18世纪大气中的CH_4开始增加，1950年CH_4浓度增加到1.25×10^{-6}，1980为1.55×10^{-6}，年增加率为1.1%。中国是水稻种植大国，稻田CH_4释放量比印度少，占第二位。据目前的增长率估算，大气中的CH_4含量至2030年将增加到2.34×10^{-6}，至2050年将达到2.5×10^{-6}。据研究，CH_4浓度由目前的1.7×10^{-6}增加1倍，将使地面平均气温增加0.2～0.4℃，至2030年，估计全球温度因CH_4增加而增高0.2～0.3℃。

其他痕量气体一氧化二氮(N_2O)、氯氟烃化合物(CFCs)也有温室效应，至2030年，N_2O由工业革命前的280×10^{-6}增加到350×10^{-6}～450×10^{-6}之间，全球地表气温约增高0.07～0.2℃。CFCs在工业革命前大气中没有这种气体，至1980年CFC_{11}，$CFCs_{12}$分别增至168×10^{-6}和285×10^{-6}，估计到2030年，将引起全球气温分别增高0.13℃和0.24℃。

(二)温室气体增加对农业的影响

关于温室气体增加对农业的影响国内外有许多研究，取得了一致的结果，不同的温室气体有不同的影响。

CO_2增加是引起气候变化的主要温室气体，同时CO_2又是农作物生产的必需物质，通过CO_2的试验结果表明，CO_2倍增使作物增产。而且在一定浓度范围内随着CO_2浓度增加产量增加。Keith等于1994年根据10年来28个国家300多篇论文得出结论，CO_2浓度倍增，各类作物的产量有不同程度的提高，C_3、C_4、CAM这3类作物对CO_2浓度倍增的反应是不同的，C_3作物受益最大，增产41%，C_4作物增产22%，CAM作物增产15%。其生理基础是净同化速率增加，气孔导度变小，蒸腾量减小。其生物量效应是增加的，经济产量提高。

近年来，中国在CO_2对农业影响方面开展了有效的研究，对小麦、玉米、水稻、大豆、棉花、花生、大白菜、芹菜、榨菜等作物进行了CO_2增加后的反应试验，取得了十分有价值的结果。

1. CO_2倍增改善了作物生理效应

作物光合速率随CO_2浓度的增加而增加，冬小麦在CO_2浓度700×10^{-6}，500×10^{-6}条件下比浓度350×10^{-6}下分别增加20.0%～41.6%和7.6%～18.4%。玉米在700×10^{-6}，600×10^{-6}，500×10^{-6}的浓度下比350×10^{-6}下分别增加6.0%～24.7%，5.0%～11.3%，2.4%～7.8%。大豆在700×10^{-6}，500×10^{-6}下的浓度下比350×10^{-6}分别增加68%和39%。

农作物的蒸腾系数随CO_2浓度增加而减小。冬小麦的蒸腾系数在CO_2浓度700×10^{-6}，500×10^{-6}的条件下比浓度为350×10^{-6}条件下分别减少4.7%～16.8%，3.5%～9.2%。玉米在CO_2浓度700×10^{-6}，600×10^{-6}，500×10^{-6}的条件下比浓度为350×10^{-6}下分别减小8.9%～23.7%，7.7%～20.0%，5.2%～14.9%。大白菜在CO_2浓度700×10^{-6}，500×10^{-6}的条件下比350×10^{-6}下分别减小27.1%和23.1%。CO_2浓度增加提高了水分利用率。

对水稻的 CO_2 浓度生理反应试验表明，CO_2 浓度增加提高了水稻种子萌发时期过氧化氢酶的活性，过氧化氢酶活性高，说明作物生长旺盛，450×10^{-6}浓度比 350×10^{-6}浓度活性提高 20.5%。CO_2 浓度增加，种子磷酸酯酶活性提高，磷酸酯酶活性高说明种子生长活力高，在 450×10^{-6} 浓度下比 350×10^{-6} 浓度下增高 12.0%。CO_2 浓度增加过氧化物酶活性下降，450×10^{-6}浓度下比 350×10^{-6}下降 24.9%，表明水稻生长发育速度加快。CO_2 浓度增加，提高了水稻吸收氮的能力，在 CO_2 浓度 600×10^{-6}、500×10^{-6}的条件下比 350×10^{-6}分别提高了 14.7% 和 21.3% ～ 30.5%，磷的吸收能力分别提高 33.1% 和 37.4%。

2. CO_2 浓度增加对作物生长发育的影响

CO_2 浓度增加由于作物光合速率增加，蒸腾系数减小，改善了作物对营养物质的吸收，生长量增加。水稻幼苗期植株高度在 500×10^{-6}，600×10^{-6}的浓度下比 350×10^{-6}浓度下增加 5.9%，根长增加 1.4%；玉米的株高(抽雄期)在 600×10^{-6}，700×10^{-6}浓度下比 350×10^{-6}分别增高 9% 和 10%；大豆株高 700×10^{-6}，500×10^{-6}浓度下比 350×10^{-6}下分别增高 13.8% 和 11.2%，花生株高分别增加 4.5% 和 12.1%。

CO_2 浓度倍增条件下作物生育期有缩短的趋势。冬小麦播种至乳熟期缩短 2～4 日，玉米播种至蜡熟期缩短 3～5 日，棉花播种至吐絮期缩短 4 日。

3. CO_2 浓度增加对作物生物量的影响

CO_2 浓度增加作物的根重、根冠比、干物重都增加。在 CO_2 浓度 700×10^{-6}，500×10^{-6}的条件下，比在 350×10^{-6}条件下，小麦根重分别增加 21% 和 10%，根冠比分别增大 10.4% 和 7.0%，干物重分别增加 32.8% 和 17.8%；玉米根重分别增加 8.9% 和 4.8%，根冠比分别增大 3.0% 和 2.0%，干物重分别增加 12.4%

和5.7%；大豆的干物重分别增加38.9%和30.2%。

4. CO_2浓度增加对作物品质的影响

大气中CO_2浓度增加对作物产品品质的影响引起人们的关注。一般认为，CO_2浓度增加植物叶片中的碳的含量会增加，而氮的含量会减少，蛋白质含量会降低。但这一现象是在缺乏弄清CO_2浓度与作物品质定量关系的研究情况下所做出的推论。中国的研究表明，目前大气中CO_2不是植物产品品质形成的最佳含量。在CO_2浓度倍增的条件下农作物产品的品质会改善，但随CO_2浓度增加品质提高达一定量后优质含量逐渐减少。据日本研究，番茄在$1\ 000\times10^{-6}$浓度以下品质会改善，抗坏血酸、脂肪酸、糖分等的含量增加，风味变浓。中国对小麦、玉米、大豆等研究，在试验设计CO_2浓度中，从350×10^{-6}增加至700×10^{-6}，品质得到改善，但品质与CO_2浓度的增加不是线性增加，而是在500×10^{-6}的浓度以下，随CO_2浓度增加优良品质的含量增加，在600×10^{-6}浓度以上优良品质含量的数量增加的量逐渐减小。

CO_2浓度倍增对棉花品质有影响。浓度700×10^{-6}比350×10^{-6}的纤维长度增加3.4%～6.6%。以上可见，大气中的CO_2浓度倍增农作物的品质不会降低，相反还会得到改善。

5. CO_2浓度增加对农作物产量的影响

CO_2浓度增加农作物产量提高，在CO_2浓度700×10^{-6}、500×10^{-6}的条件下，比350×10^{-6}下冬小麦分别增产36.1%和17.2%，玉米分别增产18.0%和8.7%，大豆分别增产33%和30%，水稻在CO_2浓度500×10^{-6}的条件下比350×10^{-6}下增产10.6%。

关于CO_2浓度增加对农作物的影响，中国的科学家有两个重要的发现，为CO_2浓度增加农作物为什么增产提供了理论论据：

CO_2浓度增加，作物在1天中的光合时间延长。小麦在CO_2

浓度 700×10^{-6}和 500×10^{-6}的条件下，光合时间分别比 350×10^{-6}浓度延长 55 min、35 min，光合开始时间提前 5～10 min；大豆光合时间分别延长 67 min、35 min。由于光合时间的延长，光合产物积累增加，产量提高。

CO_2 浓度增加，作物抗高温胁迫能力增强。在短期的同一 40℃高温处理，作物在不同 CO_2 浓度下的产量反应不同。700×10^{-6}浓度条件下比 350×10^{-6}小麦增产 29%，大豆增产 24%，玉米增产 5%。这种反应表明，CO_2 浓度增加作物抗高温胁迫能力增强。

三、温室效应对农业的影响

大气中温室气体增加引起温室的效应，全球气候出现变化，如气温增高，干湿变化，海平面升高等。这些都会给农业构成影响。国内外一致认为温室效应对农业有影响，但在影响的利弊问题上有不同的看法，一种意见认为温室效应对农业产生一些不可逆的不利影响，这种意见是不利或弊大于利论者。另一种意见认为温室效应对农业的影响有利也有弊，但总的趋势是利大于弊。从 20 世纪 70 年代后，我国的气候是变暖的，但是粮食产量并没有因气候变暖而减少，我国粮食产量从 1981 年的总产 32 500 万 t，单产 2 835 kg/hm^2，分别增至 1995 年的 4 666.68 万 t，单产 4 239 kg/hm^2，总产每年增长 3.11%，单产以每年 3.45% 的速度增长。1990 年全国性增温，粮食产量比 1989 年增产 9.0%。许多模拟实验表明，CO_2 浓度和气温增高的协同作用，促使农业增产。不利论者认为，气候变化会引起减产，只有通过大量投资来减轻气候变化对农业的影响。有利论者认为，农业通过自身的调节和农业技术改良是可以适应气候变化的影响的，气候变暖的条件可以成为可利用的有利气候资源。这些都是在讨论气候变化对农业影响时应当提到的不同观点。气候变暖的可能影响如下：

(1)气候变暖引起农业气候带和种植高度移动　大气中 CO_2 浓度增至 21 世纪中叶，热带北界大致北移 1.8 个纬度，亚热带北界北移 2 个纬度。热带地区作物种植海拔高度上升 200～350 m，亚热带地区种值高度上升 100～280 m。农作物过渡带因温度增高，蒸散量增大，以干温状况为主导指标划分的界线将向南移 20～180 km。

(2)种植制度改变　CO_2 浓度倍增至 21 世纪中叶，中国二熟制北界北移 1～4 个纬度；三熟制北界北移 3～7 个纬度。北移北界在东部偏北，西部偏南。

全国的复种指数提高。≥0℃积温增加 100℃·日，复种指数增加 1.07%；CO_2 浓度倍增，复种指数提高 6.85%。东北地区增加 0.40%，华北平原增加 2.0%，长江流域增加 10.0%，华南地区增加 11.0%，云贵高原增加 10.0%，全国作物总产量增加。

(3)全年生长期延长，作物生育期缩短　在 CO_2 浓度倍增条件下，≥0℃日数在东北地区平均延长 13 日，西北内陆地区平均延长 16 日，黄土高原延长 21 日，黄淮海平原延长 24 日，长江流域延长 21 日，华南地区延长 2 日，云贵高原延长 15 日，青藏高原延长 48 日。而一季稻生育期缩短 10～20 日；冬小麦平均缩短 34 日，主要是越冬期缩短。

(4)施肥量增加　气温每升高 1℃，土壤速效氮的损失量增加 4%。CO_2 浓度倍增，至 21 世纪中叶施肥量增加 8%。

(5)作物害虫繁殖代数增加，农药用量增加　农作物主要害虫(稻螟、粘虫、玉米螟、棉铃虫等)在 CO_2 浓度倍增时繁殖代数增加 1 代，农药用量增加 0.2～1 倍。

四、温室效应对农业影响的对策

温室效应对农业可能的影响是可以防治的，其对策如下：

(1)调整作物布局　现时的农业生产布局与气候条件大致相

适应，有什么样的气候条件就有什么样的农业种类、品种、类型和相应的农业技术。气候发生异常变化时农业生产须进行适应性调整。气候变湿的地区种植业扩大，气候变干的地区放牧业扩大，农牧界限将随干湿变化而移动，林业和畜牧业的界限随干湿变化而变动。农作物对气候变化的反应敏感，气候变暖喜温作物栽培面积扩大，栽培界线北移，晚熟品种栽培面积扩大，早熟品种栽培面积缩小。冬小麦偏春性品种面积扩大，冬性品种北移。我国东北地区北部可能种植高产作物玉米、水稻；中南部地区由早、中熟品种改种中、晚熟品种；华北地区夏玉米早熟品种改种为中、晚熟品种；长江流域双季晚稻早、中熟品种改种为中、晚熟品种；华南地区气候变暖对作物品种类型选择更宽，高产优质品种成为主栽品种。

(2)调整种植结构　气候变暖至 21 世纪中叶，我国的种植制度将发生 4 个变化。一是二熟制、三熟制的北界北移，一熟制的南部地区变为早二熟制；二是目前不稳产的二熟制、三熟制地区变为稳产熟制；三是复种指数改变，喜温作物种植比例增加，生长期长的晚熟作物种植比例增加。

(3)调整作物种植季节　由于全国全年生长季因气候变暖而延长，CO_2 浓度倍增时南方双季早稻的播种期可提早 10～20 日，双季晚稻的收获期可延迟 10～16 日；北方秋播小麦的播种期推迟 6～12 日，春播作物播种期可提前 6～12 日。总之，可以通过调整作物播种期来调控由于气候变暖生育期缩短的问题。

(4)充分利用 CO_2 浓度增加的条件扩大高产作物栽培　由于作物光合速率随 CO_2 浓度倍增而增加，大气中 CO_2 浓度增加对作物生产有利，作物因此而普遍增产。应尽量利用 CO_2 增加的条件，扩大高产作物种植面积。C_3 作物比 C_4 作物增产更明显，应扩大小麦、大豆种植面积，玉米也有明显增产效果。

(5)采取措施提高水分的利用效率　CO_2 浓度增加，作物叶片的气孔开度小，蒸腾减弱，提高了水分的利用效率。在 CO_2 倍增

的条件下应适当增加作物种植密度,促进增大植株生长量,提高蒸腾在蒸散中的比值,从而提高水分利用效率。采用节水措施,防止气温增高和气候变干的不利影响。

(6)改进施肥技术　气候变暖使化肥的施用量增大。采用化肥深施,施入深度 10 cm;在生长盛期主要根系分布在 10 cm 以下,可深施 15 cm,以减少化肥的损失。施用释放慢的长效肥料,可以减少损失。多种有机肥(牛粪、鸡粪等)混施可以减慢肥效损失。通过上述措施可以减轻或防止气候变暖对施肥量增大的影响。

(7)防治病虫害减少农药用量　研制高效低毒或无毒农药,加强生物防治,抗病虫育种,实施综合防治,可以减少农药用量,减轻病虫害危害。

(8)有机肥沼气化可以减少稻田甲烷排放　稻田施用有机肥的甲烷排放量是施用化肥的 1.30 倍左右,是不施肥的 1.34 倍。施用有机肥是稻田甲烷排放的主要排放源,采用我国农村有机肥沼气化技术,使其变为能源,将甲烷利用后的有机肥施于稻田,可以解决稻田甲烷排放问题,提高了肥效。

(9)选育适应气候变化的农业动植物品种　选育适应温室效应的动植物品种是根本措施。气候变暖≥35℃日数在南方增加 10～11 日,在华北地区增加 7～8 日,因此,耐热性品种成为选育的重要目标。家畜在高温季节的增重和产量减少,亦需选育耐热性畜种。冬作物需选育适应冬暖气候的品种。

(10)增强农业生产管理　温室效应将引起农田水分、养分、农业技术等方面的变化,须加强和改革农业生产管理,以适应气候变化的需要。①实行农业生产自动化管理:对灌溉、施肥、耕作、植物保护等各种农业技术实现自动化管理,提高农业生产管理水平。②建立模式化管理:建立作物生长模式和农业生产模式,优化指标,实现模式化栽培管理,提高技术措施的效果。③建立信息化管

理:建立农业生产综合信息系统,对农业生产进行监测,做出预测、决策,提高调控水平。④建立宏观调控管理:对全国性的农业生产布局调整、水分再分配、土地利用、其他农业资源配置等实行宏观调控管理,实现合理的农业生产布局和优质高效农业生产。

加强农业生产管理,可以提高农业适应气候变化的能力。

第六节 世界农业气候研究

一、世界农业气候研究概况

19世纪末俄国的沃耶伊可夫、德国的汉恩、20世纪初德国的柯本、第二次世界大战后美国的兰茨贝格等对世界气候先后进行了研究,但都不具备世界农业气候学内容。关于世界农业气候,最早的出版物是由前苏联Г·И·绥良尼诺夫于20世纪40年代编辑的《全球农业气候手册》,至70年代,Г·戈尼茨别尔格主编的《世界农业气候图集》编制出6月和12月世界大陆总辐射、年降水量、年蒸发力、年降水量与年蒸发力差额、干燥期、生长期热量资源(≥10℃积温)、最热月、最冷月、无霜期、积雪日数等分布图以及大量的农业气候分析图表。阿根廷农业气候学家帕帕达克斯于1952年以“冬季的寒冷程度”、“夏季的暑热程度”和“干湿度系数”为依据,以主要作物为对象,进行了世界农业气候分类。这些研究代表了20世纪70年代以前的世界农业气候研究水平。中国于20世纪80年代后开始世界农业气候研究,出版了《世界农业气候与作物气候》一书,比较系统地介绍了世界农业气候条件和作物气候条件及其时空分布规律,探讨世界作物气候条件的特点和发展农业生产的气候问题,并对中国与世界各地作物气候进行了多方面的分析,编制出世界光、热、水和水稻、水麦、玉米、大豆、棉花及其他作物的农业气候图249幅。这是截至20世纪90年代对世界农业

气候研究较系统而全面的著作，代表了 90 年代世界农业气候的研究进展。

在气候相似方面由德国林学家玛依尔(H. Mayr)从引种的角度出发，提出原产地与引入地气候条件相似才易成功的观点。美国纳顿逊(M. Y. Nutonson)从 20 世纪 40 年代起研究农业气候相似问题。以美国为基地，研究美国与世界一些地区以及世界其他地区之间的气候相似，用气温(年平均、生长季、最热月和最冷月平均)、年降水量、干燥度、经纬度等要素作为相似比较的条件，这些要素与农业关系比较密切，因此这些研究在农业引种分析上有一定的用处，但由于各种要素的农业气候指标化研究不够，比较起来农业气候学基础不充分。Γ·戈茨别尔格在《世界农业气候图集》一书中研究农业气候相似，戈氏的研究比纳氏的研究进了一步，建立了农业气候指标，对气候带的相似指标突出了特点性要素，如≥10℃积温、最低气温、最冷月气温、寒冷期、水热系数、干旱期等。在作物气候相似方面考虑生长期的气候条件，这种相似是一种农业气候要素的定量比较，因此这种农业气候相似分析有特点。

中国在农业气候相似研究方面，借用气候统计中常用的计算相似距离的方法，来度量各地之间的气候相似程度，距离越大，越不相似。这种度量叫相似系数，用欧氏距离法计算。这种方法在生物学、地质学、气象学及其他学科中已用了多年，其优点是能在 2 个相距很远的地点用 1 个量来表示相似程度，可以对各个地点进行比较。其主要问题，距离系数失去了气候条件直效性，因为直接影响农业生物体的是光、温、水、风、空气成分等因子，而且还有主导条件与次要条件的区别。在农业气候因子选择及其结合、动态过程描述等方面都很难模拟表达。

《世界农业气候与作物气候》用中国 468 个气象站与世界上 1 760个站点的主要气候资料和大量作物物候、产量资料，对作物气候条件(光、热、水等)、作物物候期、作物综合条件、相似距、气候

适宜性等方面进行了相似性比较分析，制作出世界农业气候分布图249幅，可以从农业气候的多方面了解世界农业气候状况和条件，以及中国与世界农业气候的相似性，适合于种质资源与农业技术的相互利用。

二、世界农业气候资源利用效率

根据联合国粮农组织作物生产资料，计算出世界谷物的气候资源利用效率，包括相对光能利用率、降水量利用效率和热量利用效率。

（一）相对光能利用率

$$RLUE = y \cdot LUE / Y \tag{3-11}$$

式中　$RLUE$ 为相对光能利用率（%）；y 为世界各国谷物单产（kg/hm^2）；Y 为世界平均单产（kg/hm^2）；LUE 为目前全球作物平均光能利用率（%），取值0.3%。

计算结果表明，世界谷物光能利用率最高的是西欧，荷兰达到0.76%；亚洲利用率最高为日本，达0.65%；北美洲的美国达到0.49%；中国属中等利用率国家，达0.46%；非洲利用率低，最低的安哥拉、苏丹在0.05%以下。这表明世界光能利用率低，而区域间不平衡，潜力很大。

（二）热量利用效率

用下式计算世界谷物热量利用效率

$$HUE = y / \sum t \geqslant 0℃ \tag{3-12}$$

式中　HUE 为谷物热量利用效率（%）；y 为谷物单产（kg/hm^2）；$\sum t \geqslant 0℃$ 为日平均气温大于0℃的积温。计算结果表明，世界谷物热量利用效率最高为西欧，荷兰达到2.03%，亚洲最高的朝鲜半岛和日本达到1.10%以上；北美洲美国达0.91；中国达到0.82%；热量利用效率最低的是非洲，安哥拉、苏丹、阿尔及利亚、扎伊尔等小于0.10%。世界谷物热量利用效率表明世界热量的

利用潜力很大，尤其是非洲、南美洲和亚洲西部和南部的谷物热量效率还可以大幅度提高。

(三)降水量利用效率

用下式计算谷物降水量利用效率

$$WUE = y/p \tag{3-13}$$

式中 WUE 为世界谷物降水量利用效率；y 为谷物单产(kg/hm^2)；p 为降水量(mm)。WUE 表示每1 mm降水量生产的谷物产量[$kg/(mm \cdot hm^2)$]。

计算结果表明，世界谷物降水量利用效率最高的为西欧，荷兰达到8.71[$kg/(mm \cdot hm^2)$]；亚洲朝鲜半岛、中国达到5.00[$kg/(mm \cdot hm^2)$]；非洲利用效率最低，安哥拉、扎伊尔在0.52[$kg/(mm \cdot hm^2)$]以下。可见，世界谷物降水量利用效率总体不平衡，利用的潜力还很大。

从世界农业气候资源利用效率来衡量，农业气候资源利用的潜力还很大。仅就中国而言，如将全国粮食作物气候资源利用效率提高到高产国家的利用水平，我国的粮食产量还可以提高1倍以上，与已有的高产记录相比还可以提高2～4倍。可见中国的农业气候资源开发利用的前景是十分广阔的。

第四章　农业小气候

第一节　农业小气候的基本原理

一、农业小气候的形成

农业小气候的形成基础包括物理学和生物学两个方面，农田土层和贴地气层之间的物质(如水汽、CO_2 等)交换和能量交换(如辐射、显热、潜热、土壤热交换等)，是形成农业小气候的物理学基础；农田作物群体结构的差异、动态变化及其生物学过程的影响，是形成农业小气候的生物学基础。在不同的地段、季节、昼夜和天气状况下，因辐射和大气状态不同，农业小气候形成的物理基础不一，其小气候特征也相应改变。同时随着作物种类、品种、种植方式、播种密度、生育期、生长状况、管理措施等变化，农业小气候形成的生物学基础也随之改变，小气候特征也会发生相应的变化。因此，农业小气候不仅是土壤和近地层大气间的物理过程和现象的反映，而且也是农田土壤—植物—大气所构成的系统中各组成部分之间的物质和能量交换的最终体现。

在农田土壤—植物大气系统中，土壤和大气间的物质和能量交换常用活动层的能量平衡方程表示；植物和大气之间的物质和能量交换，一般用植物群体的能量平衡方程来描述；土壤和植物之间的物质和能量交换，主要通过作物输导组织进行水分和热量输送，为作物光合作用、蒸腾过程提供物质基础，为生理活动过程提供能源。

活动面又称“作用面”，有时可称作“下垫面”，是形成小气候特

征的关键因素之一。所谓活动面，是指影响邻近空气层或物质层(如土壤层、作物层等)温度变化的表面。各种暴露的自然表面，如地表面、水表面、冰雪表面、作物表面、叶表面等都属于活动面。这些表面不断吸收外来的太阳辐射和大气辐射，同时自身又不断地向外界放射辐射。这种借助于辐射作用吸收和放出热量的过程，使邻近这些表面的空气层和其他物质的温度状况发生了变化，并引起一系列小气候特征的改变。

不同性质的活动面，因其辐射、热力、动力、水文等特性的差异，形成了不同的小气候条件。例如，在夏季晴朗天气下，水域和裸地作用面会形成截然不同的小气候特征：水域温度低、湿度大；而裸地则相反，温度高、湿度小。再如，农田作物幼苗期，土壤是吸收和放射辐射的主要层面，是邻近空气层和土壤层热量变化的源地，这时农田活动面仍主要是土壤表面，其小气候条件与裸地相差甚微。当作物封行后，原先在土壤表面发生的过程，抬升至作物最密集的部位，成为吸收辐射和放出辐射的主要层面，也是邻近其上的空气层和其下的作物层热量变化的源地，这时农田活动面就处于作物密集部位(一般约在植株2/3高度处)，也称做农田“外活动面”；而此时地表成为辐射热交换的次要场面，称做“内活动面”。在此阶段，农田小气候条件与裸地存在很大的差异。内外活动面在农田小气候形成中的主导作用随生育期而变化。在作物生长量较小的初期和茎叶枯萎脱落的后期，以内活动面为主；而作物封行后的生育盛期，则以外活动面为主。

活动面上不只是进行热量交换，同时还进行水分交换，如作物蒸腾、土壤蒸发改变了活动面的温度，引起热量交换；而蒸腾和蒸发过程本身就是进行水分交换的过程。

在作物层中，辐射的吸收和放射、水分的蒸发和凝结等热转换过程，不仅仅发生在一个面上，而常常发生在一定厚度的物质层中，这种能够完成吸收净辐射的物质层称为“活动层(作用层)”。

活动层的厚度因下垫面的性质和入射辐射的波长而异。例如，就短波太阳辐射而言，砂性土壤活动层厚几毫米，雪被达几十厘米，水体达几米或几十米。就长波辐射而论，雪被和水体活动厚度仅几分之一毫米，疏松的耕地达几厘米。作物覆盖的农田中，不论对于短波或长波辐射，作物层就是农田活动层，在大约植株高度的2/3处，为作物的活动面。

活动层的厚度和性质，决定于活动面的种类、状态以及到达活动面的辐射性质。因此，活动面的热量交换、水分交换及其形成的辐射状况，是决定贴地气层及土壤层小气候特征的基本因素。所以研究小气候形成的物理过程，需从活动面的辐射热收支开始。

活动面的热量收支，是指通过这个表面的热流量的差额（热量差额或热量平衡），它包括辐射差额（即辐射平衡）R、土壤中的热量交换 Q_s、土壤与空气的热量交换 H、乱流和蒸发的热量交换 E。根据热量守恒定律，其能（热）量平衡方程为：

$$R + Q_s + H + E = 0 \qquad (4-1)$$

严格地讲，式(4－1)中还应列入有关光合（呼吸）作用等生物学过程的热量收支，因其量值不足辐射平衡的百分之几，故而省略。以下对热量平衡方程中的各项分别进行阐述。

二、辐射平衡

作用面的辐射平衡（又称辐射收支、辐射差额或净辐射）是由短波辐射和长波辐射组成。短波辐射是以太阳直接和散射的形式到达作用面，其中一部分又从作用面上反射回去。短波辐射平衡 R_S 为：

$$R_S = (S' + D)(1 - A) \qquad (4-2)$$

式中　S'和 D 分别为太阳直接辐射和散射辐射；A 为反射率。

长波部分的辐射平衡 R_L 包括长波辐射 U 和大气逆辐射 G，此二辐射之差称为有效辐射 F。

作用面的辐射平衡 R 为：

$$R = R_S + R_L = (S' + D)(1 - A) + F \qquad (4-3)$$

对于不同的作用面，式(4－3)中的各分量(太阳总辐射、反射率、有效辐射)具有各自的分布特征，对辐射平衡有不同程度的影响。

(一)太阳总辐射

太阳总辐射包括直接辐射和散射辐射。在白天，它是辐射平衡中最主要的组成部分。晴天太阳总辐射强，小气候差异显著；阴天太阳总辐射弱，小气候差异趋于缓和。在总辐射中，直接辐射对辐射平衡的影响显得格外重要，起着主导作用。散射辐射随地方条件的变化较小，对辐射平衡的影响并不大。因此，直接辐射是形成小气候特征的物理基础，它受下垫面几何特性的作用会产生很大的变化，对辐射平衡的影响非常复杂。例如，小丘和山谷、南坡和北坡、耕地的田埂和犁沟、水田和旱地、植被和裸地，等等，受太阳高度角、方位角和太阳赤纬的不同影响，所接受到的直接辐射量值也各不相同。

翁笃鸣(1981)探讨了坡地、植被、水面、雪被等不同活动面(层)的太阳辐射分布。

1.坡面的直接辐射

坡面的相对直接辐射可用下式表示：

$$S_{\alpha\beta}/S' = \cos\alpha + \mathrm{ctg}\, h_{\odot} \cdot \cos(A - \beta) \cdot \sin\alpha \qquad (4-4)$$

式中 $S_{\alpha\beta}$为坡面接受的太阳直接辐射；S'为水平面上的太阳直接辐射；α 为坡度；$h_{\odot}$为太阳高度角；A 为太阳方位角；β 为坡向(正南为 0)。

在正午时刻，$A=0$，则式(4－4)为：

$$S_{\alpha\beta}/S' = \cos\alpha + \mathrm{ctg}\, h_{\odot} \cdot \cos\beta \cdot \sin\alpha \qquad (4-5)$$

利用式(4－5)计算南京(纬度 32°N)正午时刻不同坡面上的相对直接辐射分布，结果如表 4－1。

表 4－1 南京 $\varphi=32°N$ 各季正午时不同坡地上的相对直接辐射 $\frac{S_{\alpha\beta}}{S'}$ 分布

坡向 a / 太阳高度角 h	水平面	S(β=0°)					S^{E}_{W}(β=±45°)				
	0°	10°	20°	30°	45°	90°	10°	20°	30°	45°	90°
35°	1.00	1.23	1.43	1.58	1.72	1.43	1.16	1.28	1.37	1.42	1.01
45°	1.00	1.16	1.28	1.37	1.42	1.00	1.11	1.18	1.22	1.21	0.71
55°	1.00	1.10	1.18	1.21	1.20	0.70	1.07	1.10	1.11	1.06	0.50
65°	1.00	1.07	1.10	1.10	1.07	0.47	1.04	1.05	1.03	0.94	0.33
80°	1.00	1.04	1.00	0.95	0.83	0.18	1.00	0.98	0.93	0.80	0.13

坡向 a / 太阳高度角 h	E, W(β=±90°)					N^{E}_{W}(β=±135°)				
	10°	20°	30°	45°	90°	10°	20°	30°	45°	90°
35°	0.99	0.94	0.86	0.71	0.00	0.81	0.59	0.36	0.00	0.00
45°	0.99	0.94	0.86	0.71	0.00	0.86	0.70	0.51	0.21	0.00
55°	0.99	0.94	0.86	0.71	0.00	0.90	0.77	0.62	0.36	0.00
65°	0.99	0.94	0.86	0.71	0.00	0.93	0.83	0.70	0.47	0.00
80°	0.99	0.94	0.86	0.71	0.00	0.96	0.90	0.87	0.62	0.00

坡向 a / 太阳高度角 h	N(β=±180°)				
	10°	20°	30°	45°	90°
35°	0.74	0.45	0.15	0.00	0.00
45°	0.81	0.59	0.37	0.00	0.00
55°	0.86	0.70	0.52	0.21	0.00
65°	0.90	0.78	0.63	0.38	0.00
80°	0.91	0.88	0.78	0.58	0.00

表 4-1 表明：正午时刻，南坡相对直接辐射最大，东南、西南次之，北坡最小。随着 β 绝对值的增大，$S_{\alpha\beta}/S'$ 逐渐减小，坡地与水平面的辐射差异总趋势是随坡度 α 的增加而增大。α 较小时，坡向差异不显著（$S_{\alpha\beta}/S'$ 比值接近于 1）；当 α 较大时，各种坡向辐射差异明显增大。$S_{\alpha\beta}/S'$ 在南坡随太阳高度角 $h_{\odot}$ 的增加而减小，北坡随 $h_{\odot}$ 的增加而略增大。

由此可见，各坡地正午的辐射差异，在太阳高度角较小和坡度较大的条件下较为显著。

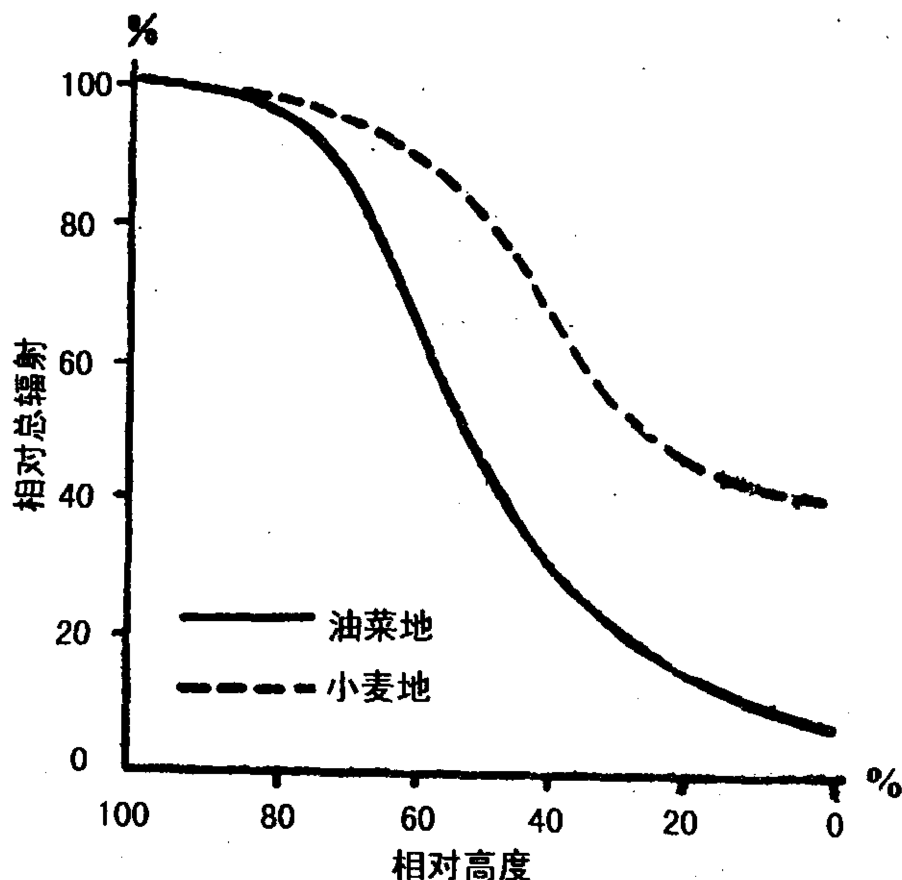


图 4-1 相对总辐射在植被中的分布

油菜株高 158 cm 小麦株高 123 cm （南京气象学院 1965 年 5 月 8 日 10 时）

2. 植被的太阳辐射

太阳辐射（S' 和 D）投射到植被表面，经植株层层吸收、反射、

透射到达地面后，能量有很大的衰减。其衰减的程度与植株密度、品种、生育阶段、生育状况等密切相关。图 4－1 为翁笃鸣等在油菜和小麦地中测定的相对总辐射（植株各层高度的总辐射与植株顶部表面总辐射之比）在植被中的分布。

由图 4－1 可见，植被层中的相对总辐射随植株相对高度的减小而降低，在植株相对高度 20%～70% 处，下降最为迅速。图中还可以看到，油菜地的相对总辐射在同一高度下比小麦地小。这是由于油菜叶比小麦叶片大，对辐射的遮挡较多的缘故。

3. 水体的太阳辐射

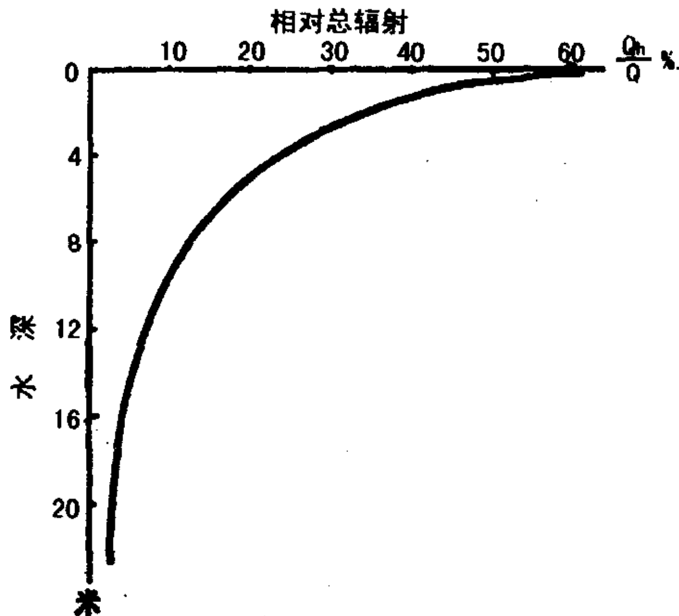


图 4－2　相对总辐射在水中的分布
塞凡湖　7 月平均

X 水分子对长波辐射有很强的吸收作用，只有短波辐射才能进入较深的水中，水体内的辐射衰减与水深呈负指数关系。

$$Q_h = Q'(1 - A)e^{-a \cdot h} \quad (4-6)$$

式中　h 为水深度；Q_h 和 Q' 分别为 h 深度处和水平面的总辐射；A 为水面反射率；a 为水对总辐射的衰减系数（因水域而异）。

图 4－2 为 T·B·基里洛娃在塞凡湖中测定的相对总辐射在水中的分布。可以看出，相对总辐射随着水深的增加而迅速减弱，在 0.5 m 深处就减少了一半，只有少量的短波辐射可以透至 10～20 m 深处。

4. 雪被层的太阳辐射

雪被的太阳辐射透射率比水体小许多，约几十厘米厚的雪层就能吸收到达雪被表面的全部太阳辐射。辐射在雪中传播的衰减过程可用Γ·K·苏拉克利泽经验公式描述。

$$Q = (Q_1 - Q_2)e^{-kfz} \tag{4-7}$$

式中 Q_1 和 Q_2 为雪被上方 8 cm 高度处测定的向下和向上(反射)的总辐射；f 为积雪密度；k 为雪的吸收系数(与 f 有关)；Z 为积雪深度。

积雪的状态和结构对辐射的衰减影响很大。据H·H·卡里金提供的资料，干雪在2～3 cm深处辐射的透过率达90%左右，在10 cm处减至18%，50 cm处已不足1%。湿雪的透射率更小，10 cm深处仅2.3%。

(二)反射辐射

表4-2 自然表面的反射率 (翁笃鸣等 1981)

表面状态	反射率(%)
新雪	80～95
旧雪	42～70
干燥砂土	25～45
干燥粘土	20～35
新翻黑色潮湿黑钙土	5
平坦黑灰色干燥黑钙土	12
泥炭土	5～15
干砂地	18
湿砂地	9
针叶林	10～15
落叶林	15～20
农作物	20～30
水稻田	12
冬小麦	16～23
棉花	20～22

到达作用面的总辐射有一部分被反射到大气中，称“反射辐射”。反射辐射的大小取决于各种作用面对太阳辐射的反射能力。局地间反射率特性的差异，主要与各种作用面的物理性质有关，如颜色、湿度、粗糙度等(表 4－2)。由表 4－2 可见，水田和旱地、新雪和旧雪、砂土和粘土、干土与湿土，反射率各不相同；植物的反射率因种类、品种、生育期的差异而有所变化。

通常，下垫面的反射率随着湿度、粗糙度的增加和色泽的加深而减小(图 4－3)。颜色较浅(淡)、湿度较低、颗粒较细的土壤反射率较大；洁白的新雪反射率明显高于灰色的陈雪；绿色、郁闭植被的反射率大于黄色、稀疏的植被；阔叶林反射率大于针叶林。

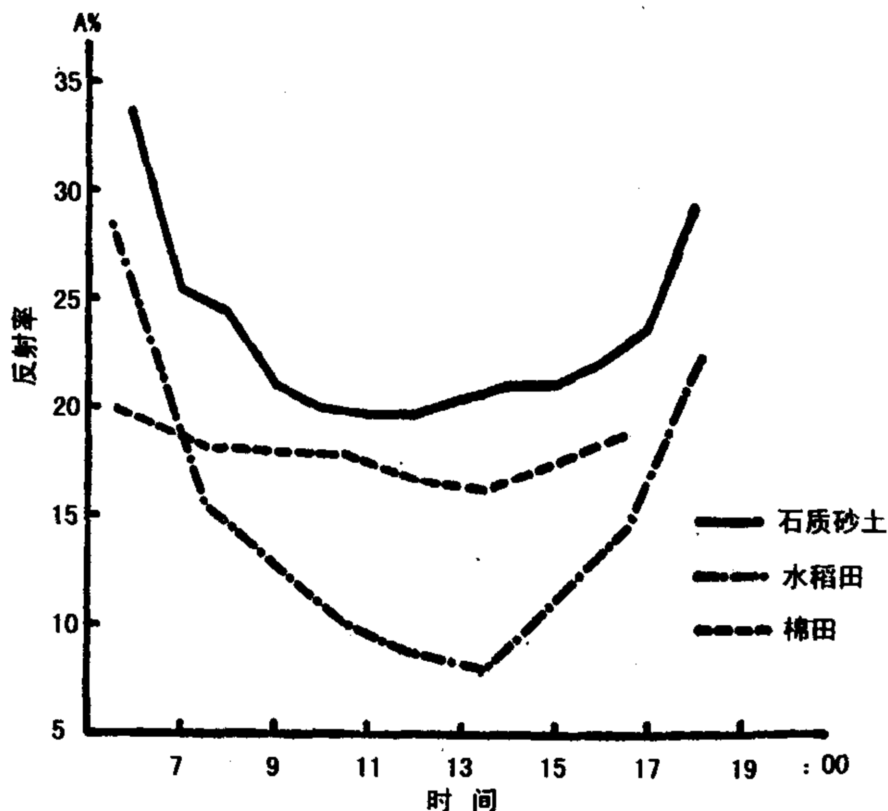


图 4－3 各种下垫面反射率的日变化

此外，太阳高度角也会引起同一下垫面反射率的变化，无论是砂土或是粘土、农田还是水面，其反射率都随着太阳高度角的增大

而减小。

可见，作用面对太阳辐射反射率的差异，也是造成各种小气候特征差异的主要原因之一。

(三)有效辐射

作用面的有效辐射由式(4－8)表示：

$$F = U - SG \qquad (4-8)$$

式中 F 为有效辐射；U 为地面长波辐射；G 为大气逆辐射；S 为下垫面的相对辐射系数(灰体系数)。

地面长波辐射直接与辐射的温度有关。

$$U = S\sigma\theta^4 \qquad (4-9)$$

式中 σ 为斯蒂芬—波兹曼常数；θ 为下垫面的温度(以绝对温度表示)；下垫面的相对辐射系数 S 通常取值为 0.95。

翁笃鸣等从南京晴天的观测资料发现，晴天大气逆辐射与长波辐射存在着很好的线性关系，其关系如下：

$$SG = 0.68(U + 0.1) \qquad (4-10)$$

其相关系数高达 0.97。

有些学者研究了晴天地面的有效辐射指出，晴天地面有效辐射是温度与空气湿度的函数。

$$F = S\sigma\theta^4 - S\sigma T^4 \cdot f(e) \qquad (4-11)$$

式中 θ 为下垫面温度；T 为气温；$f(e)$ 是空气湿度的函数。

有云天空的有效辐射较为复杂，它不仅受温度、湿度的影响，而且还与云量有关。这是因为有云的天空使得大气逆辐射增加，云中水滴浓度越大，云层越厚、越低，逆辐射就越强，有效辐射就越小。

有效辐射测量难度较大，观测资料很少。不少学者通过实验提出一些经验公式来计算有效辐射。

C·A·萨鲍日尼科娃研究了云量、云状对有效辐射的影响。

$$F_n = F_0(1 - K_1n_1 - K_2n_2 - K_3n_3) \qquad (4-12)$$

式中 F_n 和 F_0 分别为有云天空和晴天的有效辐射；n_1, n_2, n_3 分别为低、中、高云量(云量以十分数表示)，K 为经验系数，$K_1=0.8, K_2=0.5, K_3=0.2$。

N·J·罗森堡给出 Brunt 经验公式计算 F：

$$F = \sigma T^4(0.56 - 0.08e)(1 - ac) \quad (4-13)$$

式中 F 为地面有效辐射；T 为气温(以绝对温度表示)；e 为水汽压；a 是与云状有关的系数；c 是云量(以十分数表示)。

由此可见，作用面温度、空气湿度及天空云量、云状是影响局地小气候范围内有效辐射变化的重要因素。

受太阳辐射的作用，地面有效辐射也存在着明显的日变化。晴天最大值出现在午后，最小值出现在清晨，其变化过程与地表温度日变化趋势一致。

(四)辐射平衡

下垫面的辐射平衡是短波平衡 R_S 与长波辐射平衡 R_L 之和，也是向下和向上总辐射通过的差值，又称"净辐射"，是下垫面获得的有效能量。

$$R = R_S + R_L = S' + D - R_K + SG - U \quad (4-14)$$

式中 R 为下垫面辐射平衡；S' 为太阳直接辐射；D 为散射辐射；R_K 下垫面反射辐射；G 为大气逆辐射；S 为下垫面的灰体系数；U 为地面长波辐射。

$$\text{短波辐射平衡 } R_S = S' + D - R_K = Q(1 - A) \quad (4-15)$$

式中 Q 为太阳总辐射；A 为下垫面的反射率。

$$\text{长波辐射平衡 } R_L = SG - U = -F \quad (4-16)$$

式中 F 为有效辐射，表明长波辐射平衡与有效辐射数值相等，但符号相反。(4-14)式可变换为：

$$R = Q(1 - A) - F \quad (4-17)$$

式(4－17)式表明，辐射平衡就是下垫面利用的净太阳辐射能，是下垫面各种热量、动量、水分交换过程的主要能源，因此，它在小气候和农业小气候中占有非常重要的地位。地理纬度、太阳赤纬(季节)、太阳高度、天空状况、大气透明度等，是构成局地辐射状况的大气候背景；而下垫面的形状、温度条件等，则是造成局地辐射平衡小气候差异的主要原因。

辐射平衡的局地变化取决于太阳总辐射、下垫面的反射率和有效辐射(尤其是下垫面的温度)。在相同的太阳辐射条件下，下垫面的反射率越小，则辐射平衡越大；有效辐射越小，即下垫面的温度越低，辐射平衡也越大。因此人们试图通过减小下垫面的反射率或降低下垫面的温度的方法，增大作用面的辐射平衡。这已成为利用人工措施改善小气候效应的依据。例如，冬季在冰雪表面撒上煤屑，减小反射率，增加辐射平衡，加速积雪融化。再如，为了防止农田低温霜冻的危害，常常采用塑料薄膜、草帘、稻草覆盖等保护措施，隔绝地面与大气的辐射交换，减少地面有效辐射；也可以通过施放人工烟幕，减弱长波辐射的方法来增加农田辐射平衡。

辐射平衡受太阳高度角的影响，呈现明显的日变化。其变化幅度晴天大，阴天小。在晴天无云的天气条件下，白天太阳总辐射和有效辐射(负值)都随太阳高度角的增加而增大，但前者增长的幅度远远超过后者，致使辐射平衡随太阳高度增加而明显增大；夜间辐射平衡为负值(其绝对值等于有效辐射)，变化趋势依赖于地表温度。

图4－4为南京1979年5年28～31日晴天辐射平衡及其分量的日变化。该图表明，辐射平衡日变化的基本特征与总辐射日变化相似，最大值出现在接近正午，白天为正、夜间为负，日出后经过较短时间就由负值变成正值，日落之前一般时间已变成负值，最低值出现在傍晚前后。

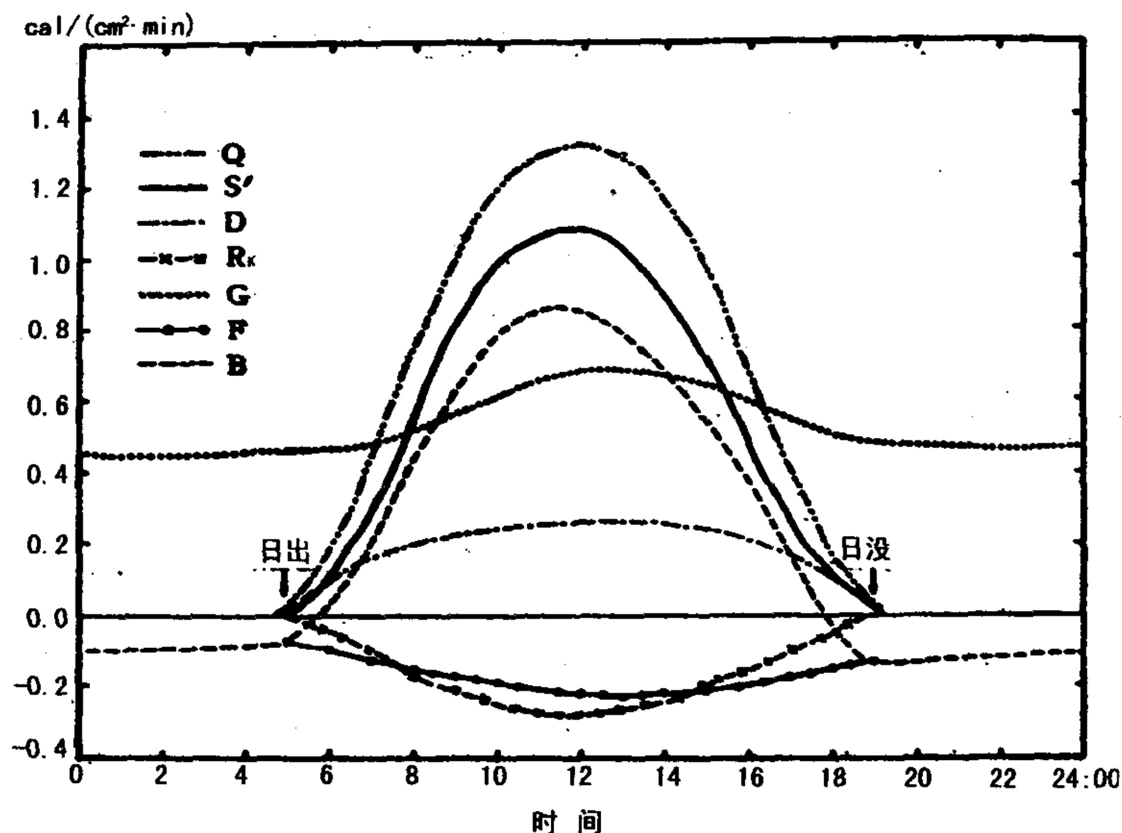


图 4－4　晴天时辐射平衡及其各分量的日变化
1979 年 5 月 28～31 日平均　(翁笃鸣等　1981)
Q.总辐射　*S*′.直接辐射　*D*.散射辐射　R_K 反射辐射　*G*.大气辐射　*F*.有效辐射　*B*.辐射平衡

以上讨论可以看出，下垫面上不同的辐射平衡及其各分量，是造成局地小气候差异的根本原因。因此，可以通过人工措施改变下垫面的辐射条件(总辐射、地表反射率和有效辐射)和辐射平衡，充分合理利用太阳能资源，改善农业小气候环境，以提高农业产量。

三、土壤热交换

作用面吸收太阳辐射能以后转变成热能，并传送到整个作用层，包括近地气层、植被层和耕作层土壤。白天土壤表面吸收的太

阳能,以分子传导方式把部分热量向下层传送,使下层土壤增温;夜间土壤表面辐射冷却,温度迅速下降并低于深层土温,热量则由下层土壤向土壤表面传递。这种发生在土壤表面与深层之间热量双向传播的过程,称为“土壤热交换”。土壤热交换的大小,用土壤热通量来度量。土壤热通量表示单位时间内沿着铅直方向通过单位面积的土壤热流量[cal/(cm^2·min)]①。其量值主要决定于土壤的热力特性,而土壤的组成、结构和温度对土壤热力特性有着重要的影响。

(一)土壤热力特性

土壤热力特性包括土壤热容量、土壤导热率和导温率。

1.土壤热容量

土壤热容量有 2 种表示方法:一种是重量热容量,即 1 g 土壤增温 1℃ 时所需的热量[cal/(g·℃)],通常称为“比热”;另一种是容积热容量,常简称为热容量,是指 1 cm^3 的土壤增温 1℃ 时所需的热量[cal/(cm^3·℃)]。

比热和热容量的关系为:

$$C_V = \rho \cdot C$$

式中 C_V 为容积热容量;C 为比热;ρ 为物质密度(g/cm^3)。

土壤是由固态、液态(水)和气态(空气)三相组成的多孔体。其中固态颗粒主要成分为矿物质和少量的有机质,它与水、空气三种物质的热容量有很大的不同(表 4-3)。

由表 4-3 可见,土壤中水的热容量最大,是固态矿物质的 3~5 倍,是空气的 3 000 倍左右。一般情况下,土壤中的固态成分变化极小,只有孔隙内的水和空气经常相互消长而变化。因此,土壤容积热容量主要决定于土壤湿度的大小。当土壤湿度增加(土

① 其中“cal”为非法定计量单位。它与法定计量单位“J”的换算关系为:1 cal = 4.186 8 J。

壤中空气含量减少，含水量增高)时，土壤热容量就增大；反之，当土壤湿度降低，土壤热容量随之减小。

表 4-3 土壤热容量 (林成谷 1983)

土壤成分	比热[cal/(g·℃)]	容积热容量[cal/(cm³·℃)]
矿物质土粒	0.2	0.20-0.30
有机质	0.44-0.48	
水	1	1
空气	0.24	0.000 3

2. 土壤导热率

土壤导热率又称"传导率"。当土壤垂直温度梯度为 1℃/cm 时，单位时间通过 1 cm^2 横截面积土壤的热量，即为土壤导热率。

进入土壤的热通量速度，取决于土壤垂直温度梯度和土壤导热率。若土壤表面与深度之间的温度差越大，进入土壤或从土壤散出的热量就越多。当温度梯度一定时，土壤热交换的强弱则于土壤导热率成正比。土壤热交换过程可用下式表达：

$$Q_s = -\lambda \frac{dT}{dZ} = -\lambda \frac{T_2 - T_0}{Z_2 - Z_0} \qquad (4-18)$$

式中 Q_s 为土壤热通量[$cal/cm^2 \cdot S$)]；$\frac{dT}{dZ}$ 为垂直温度梯度(℃/cm)；Z 为土壤深度(cm)；T 为土壤温度(℃)；下标 0 和 2 分别表示土壤表面和 Z 深度的土壤；λ 为导热率[cal/(cm·℃·S)]。当土壤温度由表面向下层递减，$\frac{dT}{dZ}<0$，则 $Q_s>0$ 即表示热量自土壤表面向下传递至深层土壤；反之，当土壤温度由表面向下层递增，$\frac{dT}{dZ}>0$，则 $Q_s<0$，表示热量由土壤下层向上传递到土壤表面。

土壤的导热性能依赖于土壤中固体颗粒互相接触的形态、性

质、孔隙度、含水量和有机质含量。表 4－4 为几种物质的导热率 λ 和导温率 K。

表 4－4 各种物质的导热率 λ 和导温率 （翁笃鸣等 1981）

物质	λ [cal/(cm·℃·S)]	K (cm²/S)
砂土	0.002 8	0.12(湿砂)～0.001 3(干砂)
土壤	0.003 0	0.007 0
花岗岩	0.009 7	0.019 0
新雪	0.000 2	0.006 7
老雪	0.000 7	0.003 2
空气	0.000 05	0.161
水	0.001 5	0.001 5
冰	0.005 5	0.012

土壤导热率随着其孔隙度的增加而减小，增加孔隙度使土壤中含有更多的空气，从而导致土壤 λ 迅速减小。通常，耕作土壤的孔隙度约为 30～40％，新翻土壤的孔隙度约 60％以上。在干燥条件下，前者的导热率要比后者大 1～4 倍。

土壤的导热率又随土壤含水量的增加而增大。细砂土含水量较低且孔隙度小，导热率随土壤含水量的增加迅速增大；粘土含水量较高且孔隙度大，导热率随土壤湿度的增加而缓慢增长。

在农业生产实践中，人们常常采用一些农业技术措施，通过改变土壤导热率来改善农田小气候状态。例如，初冬麦田镇压（减小孔隙度）、灌水（增加土壤湿度），可以提高土壤导热率，加快土壤深层的热量向表层传递，避免作物根部遭受低温危害。

3. 土壤导温率

导热率 λ 决定了土壤热传导的速度，但并不能反映土壤各层的温度状况，因为土壤中热量传递引起的温度变化随土壤热容量而改变。

$$\lambda = C\rho K = C_V \cdot K \qquad (4-19)$$

式中 C 为比热;ρ 为密度;C_V 为容积热容量;K 为导温率(又称"热扩散率"或"导温系数")。

导温率表示单位体积的土壤在单位时间内通过热传导从铅直方向获得或放出 λ 卡热量时所引起的温度变化量(cm^2/S)。因此,导温率决定土壤温度变化的快慢。导温率大的土壤,温度日变化和年变化所能达到的深度大,即温度波能传到很深的土层中去。相反,导温性差的土壤,温度波不能往深处传递,土壤表层温度日较差和年较差都很大。

各种物质的导温率如表 4-4 所示。空气的导温率最大,水的导温率最小。

(二)土壤热通量的计算

土壤热通量可以用平板热通量仪(热通量板、热流板)直接测量,也可以根据土壤温度的变化进行计算,其计算方法主要有以下 3 种:

1. 莱赫哈特曼-采京方法

该方法是由 Д·Л·莱赫特曼(1947)提出,经 Г·Х·采京(1953)简化建立起来,我国至今仍以此作为气象台站的规范方法。它根据土壤热传导方程导出:

$$Q_s = \frac{C_V}{\tau}(S_1 - \frac{K}{10}S_2) \qquad (4-20)$$

式中 $S_1 = 20(0.082\Delta\theta_0 + 0.333\Delta\theta_5 + 0.175\Delta\theta_{10} + 0.156\Delta\theta_{15} + 0.004\Delta\theta_{20}$

$$S_2 = \frac{\tau}{2}[\theta_{(20,t_1)} - \theta_{(10,t_1)} + \theta_{(20,t_2)} - \theta_{(10,t_2)}]$$

Q_S 为从 t_1 时刻至 t_2 时刻的土壤热通量[$cal/(cm^2 \cdot min)$];$\tau = t_2 - t_1(min)$;$\Delta\theta_0$, $\Delta\theta_5$, $\Delta\theta_{10}$, $\Delta\theta_{15}$, $\Delta\theta_{20}$分别为 0, 5, 10, 15, 20 cm 土壤深处相邻二次测时间内的地温差,即 t_2 时刻的地温 - t_1 时刻

的地温(℃)；$\theta_{(20,t_1)}$和 $\theta_{(10,t_1)}$分别表示 t_1 时刻 20 cm 和 10 cm 深处的土壤温度；$\theta_{(20,t_2)}$和 θ $(10,t_2)$分别表示 t_2 时刻 20 cm 和 10 cm 深处的土温(℃)；C_V 为土壤容积热容量[cal/(cm³·℃)]；K 为导温率(cm²/h)。

只要根据 t_1 和 t_2 时刻各层土壤的温度，即可由式(4－20)很方便地计算出土壤热通量。但这种方法也有不足之处：①在整层土壤中都将 K 和 C_V 作为一个常数处理。实际上由于蒸发、降水和地下水流动，使各层土壤湿度的时空分布不均而引起 K 和 C_V 的变动)。②土壤温度非线性的垂直分布对各层土壤温度梯度的影响未加考虑，这些都会造成计算误差。

2. 土柱热含量法

根据热量平衡原理，在一定时间间隙内，经由土壤表面流入(出)土柱的平均热通量等于土柱中热含量的变化。

$$Q_s = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_0^{Z_c} C_V \frac{\partial T}{\partial t} dz = \frac{1}{t_2 - t_1}\sum_{i=1}^{n} H_i C_{Vi} \Delta T_i \tag{4－21}$$

式中 t_1 和 t_2 为观测起、止时刻；Z_c 为地温日变化恒温层的深度；把 $0 \sim Z_c$ 土柱分割为 i 层，H_i、C_{Vi}和 ΔT_i 分别为第 i 层的厚度、平均容积热容量和地温变化；$\Delta T_i = T_i(t_1) - T_i(t_2)$。

土壤温度日变化的恒温层一般在 40～80 cm，因此，当地温观测深度在 80 cm 以下时，采用这种方法可行。

3. 热传导法

根据土壤热传导方程和土壤温波方程可得：

$$Q_s(0,t) = \Delta T_0 \lambda C_V \omega \sin(\omega t + \psi + \frac{\pi}{4}) \tag{4－22}$$

式中 $Q_s(0,t)$是 t 时刻通过土壤表面的热通量；λ 和 C_V 分别为土壤导热率和容积热容量；ΔT_0 为地面温度日振幅；$\omega = \frac{2\pi}{T}$ 为时

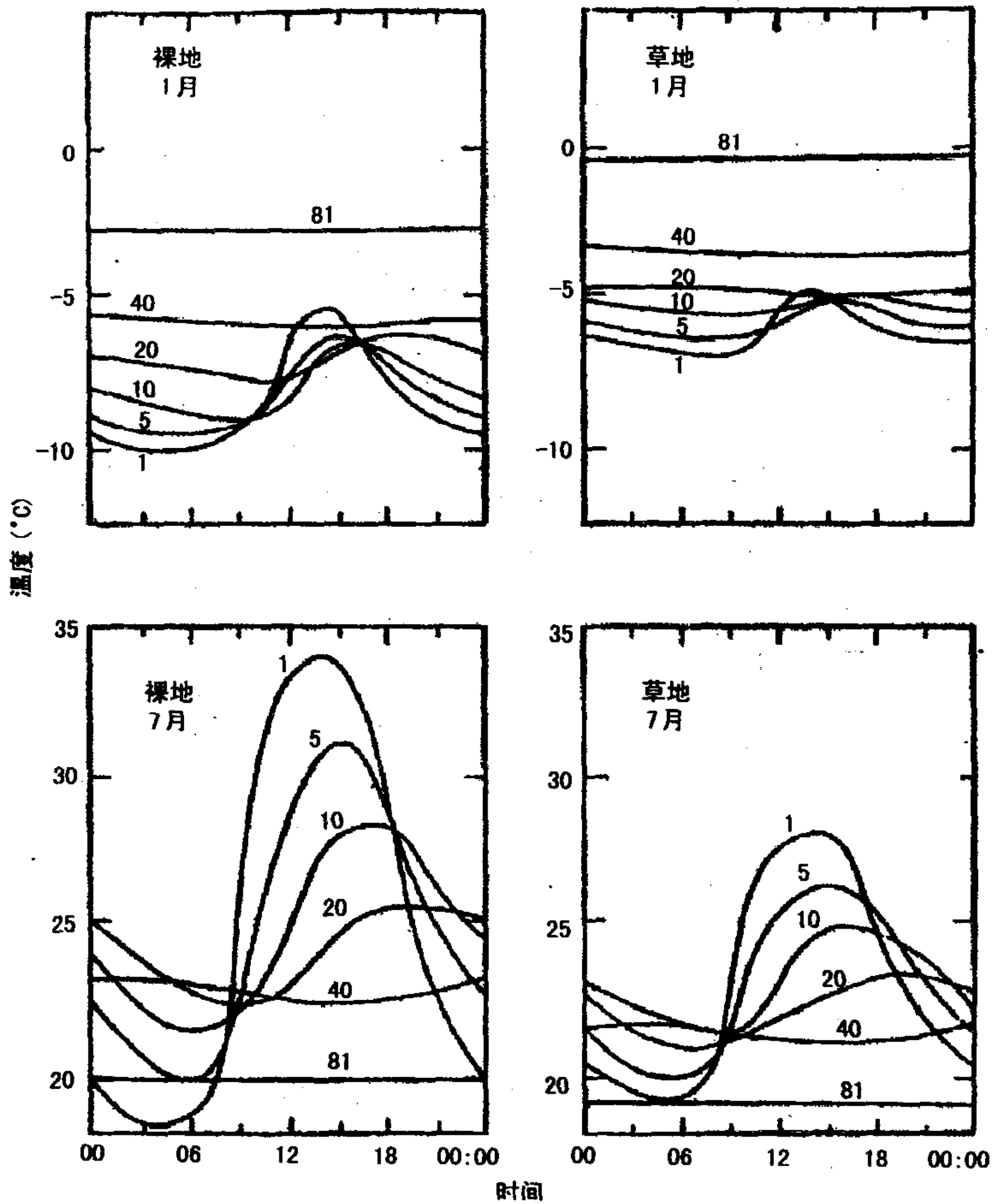


图 4－5 明尼苏达州圣保罗 1961 年 1 月和 7 月
裸地和草地 1～81 cm 各层土壤平均温度日变化
土壤深度以 cm 表示(根据 Baker 1965)

角，其中 T 为周期；ψ 为相位差。

晴天，土壤温度日变化具有较为典型的正弦波形式，使用这种

方法效果较好；多云、阴雨天气，土壤日变化的温波方程偏离正弦波形式，采用这种方法误差大。

(三)土壤温度状况

太阳辐射是土壤温度变化的热源。随着太阳辐射的日变化和季节变化，土壤温度也发生相应的变化。

1.土壤温度日变化

土壤表层白天吸收太阳辐射增热，夜间又以长波辐射形式散热，引起土壤温度日变化。图 4－5 为明尼苏达州圣保罗 1 月和 7 月裸地和草地 1～81 cm 各层土壤温度的日变化曲线。由此图可见，土壤温度日变化呈现明显的周期性波动。日变化振幅随土壤深度的增加而减小，地表最大，40 cm 深处振幅显著减小。白天表层温度高于深层，而夜间相反，深层土温高于表层。表层最高温度出现在 14:00 前后，最低温度在 5:00～6:00。随深度的增加，最高和最低温度出现时间略有延后。图 4－5 中还表明，夏季 7 月日变幅高于冬季 1 月，裸地大于草地，冬季恒温层深度约 40 cm，夏季 80 cm。

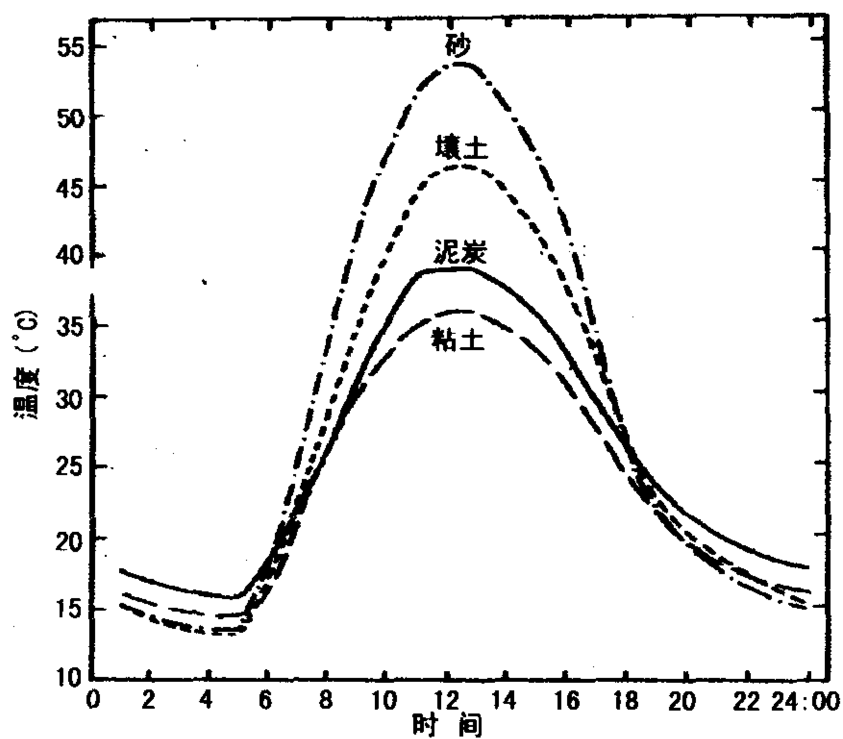
土壤温度日变幅与土壤质地有关，图 4－6 为砂土、壤土、泥炭和粘土的温度日变化曲线，日变幅砂土＞壤土＞泥炭＞粘土。

2.土壤温度年变化

土壤温度年变化曲线如图 4－7 所示。年变幅随土壤深度的增加而减小。和气温年变化类似，地表温度最大值出现在 7 月，最低值在 1 月，最高和最低温度出现时间随土壤深度增加逐渐推迟。2 月中旬气温开始上升，地表温度渐渐高于地下，差距逐月增大，7～8 月后差距逐月减小，9 月地表温度渐渐低于下层，至 1 月差值达最大。土壤温度年振幅大约在 7～15 m 深度消失。

3.土壤温度廓线

在太阳辐射作用下，土壤中的热量不断进行上下交换，土壤温度廓线走势也迅速改变。由图 4－8 可见，土壤表面清晨(6:00)最



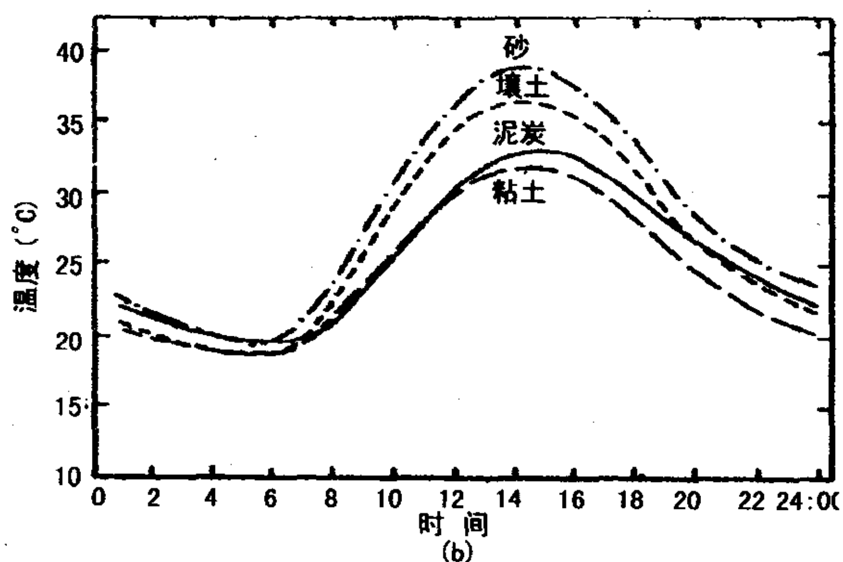


图 4-6 夏季晴天温度的日变化

(a)地表,(b)50cm 土壤深度(after Yakuwa 1946)

冷,午后(14:00)最暖。温度日波动振幅随土壤深度增加而减小。中午在 1 m 深度以内,热量直接向下传递,夏季土壤每日净获得热量(储存热量)。

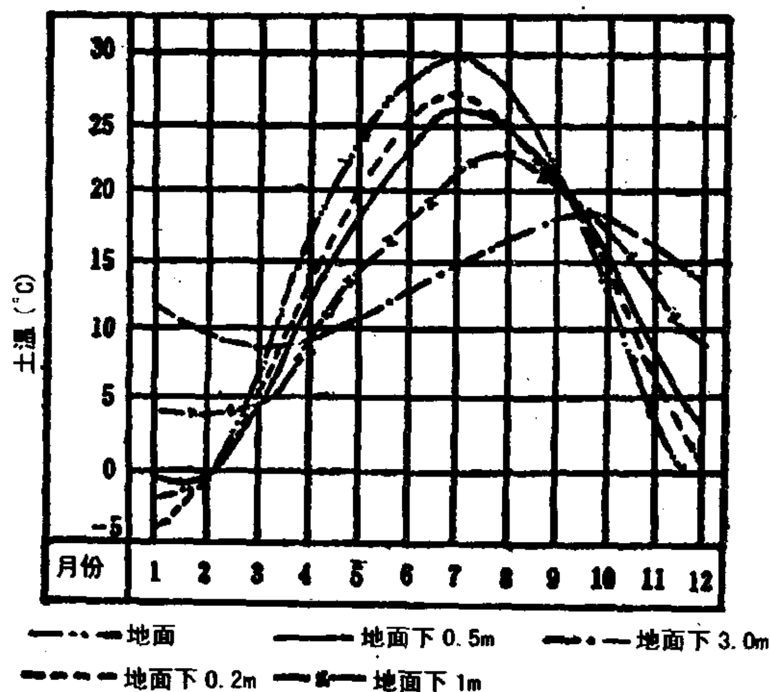


图 4-7 土温年变化曲线(陶鼎来等 1994)

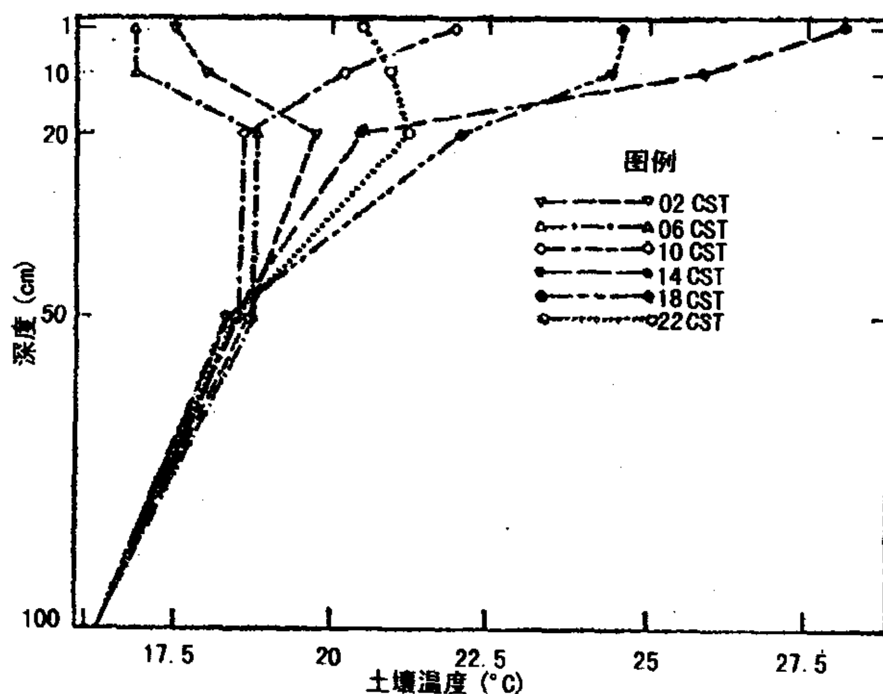


图 4-8 伊利诺斯州阿尔贡 1995 年 7 月 27 日一个夏天正常日子土壤垂直温度廓线(根据 Carson 和 Moses 1963)

图中 CST,是 Central Standard Time 的缩写,其意义为中央标准时。——译者注

四、活动面—大气的热量输送和水汽输送

活动面与大气之间热量传送和水汽输送，是通过显热交换和潜热交换进行。

(一)显热交换

不论是暴露在辐射中的物体，还是由其他方式传送给它们能量的物体，都要通过对流(片流和乱流)转换其中一部分能量，这种转换称“显热交换”，又称“感热交换”。显热交换包括2种形式，一种是分子热传导(片流边界层)，另一种是乱流热交换(乱流边界层)。

1.分子热传导

片流边界的感热通量通过分子扩散进行

$$A = -\rho C_p \alpha_h \frac{dT}{dZ} \quad (4-23)$$

式中　A 为分子扩散的感热通量；ρ 为空气密度；C_p 为空气定压比热[0.24cal/(g·℃)]，α_h 空气分子热扩散率(即导温系数0.16~0.24 cm^2/S；$\frac{dT}{dZ}$为片流边界层的垂直温度梯度。

当$\frac{dT}{dZ}<0$，即温度随高度升高而降低，则$A>0$，表示热量由地表向空气传送；当$\frac{dT}{dZ}>0$，则$A<0$，热量由空气送入地表。

2.乱流热交换

乱流又称“湍流”，是地表与近地气层间热量、水汽、动量、CO_2等交换的主要途径，对近地层气候、农业小气候有重要影响。乱流包括热力乱流和动力乱流。热力乱流是由于局地受热不均而形成的不规则小型气流和小型涡旋，成为热量传输的主要动力；动力乱流是由地面粗糙度、上下层空气风速差引起气流，成为水汽、动量、CO_2输送的主要动力。

乱流边界层的感热通量是通过乱流热交换进行的：

$$H = -\rho c_p K_h \frac{dT}{dZ} \qquad (4-24)$$

式中 H 为乱流显热交换通量[cal/(cm^2·min)]；K_h 为空气显热湍流交换系数(其范围 0～10^{4}cm^2/S)；$\frac{dT}{dZ}$是 2 层高度间的温度梯度。

在农田边界层中，通常 K_h 比 α_h 大几个数量级(例如裸地中午显热通量密度可达 100 W/m^2，K_h 约为 α_h 的 10 万倍)，因此农田显热交换可视为农田乱流交换(分子交换的作用极小)。

显热通量 H 决定于 K_h 和温度梯度，热交换的方向由温度梯度决定，白天温度随高度递减，$\frac{dT}{dZ}<0$，则 H 为正(从地面指向大气)；夜间出现逆温，$\frac{dT}{dZ}<0$，则 H 为负(从大气指向地面)。

(二)潜热交换

农田活动层和大气之间，除了因温度梯度而引起的显热交换外，还存在由于水分相变而引起的潜热交换。下垫面和大气之间的水分输送包括农田蒸散和凝结两个相反的过程。当水分从农田进入大气时，在向大气输送水汽的同时，还带走蒸发所吸收的汽化潜热；当水汽在作物表面或土壤表面凝结时，又放出潜热送还给农田作物层或土壤表面，这就是农田潜热交换。农田蒸散的水分可用其所耗热量来计算，或用农田潜热交换来衡量。

$$LE = -\rho L K_w \frac{dq}{dZ} \qquad (4-25)$$

式中 LE 为潜热通量；L 为水的汽化潜热；E 为水汽通量；ρ 为空气密度；K_w 为水汽扩散系数(又称“水汽乱流交换系数”)，$\frac{dq}{dZ}$为比湿梯度；q 比湿。

$$q = \frac{\rho_w}{\rho} \times \frac{e}{\rho - e} \approx \frac{\rho_w}{\rho} \times \frac{e}{p} \approx 0.622 \frac{e}{p} \qquad (4-26)$$

式中　e 是水汽压；p 为大气压，$p \gg e$；ρ_w 为水汽密度。

$$\therefore LE = -\rho L K_w \frac{0.622}{p}\frac{de}{dz} \tag{4-27}$$

(三)鲍恩比(Bowen ratio)

鲍恩比是表示近地层内热能分配的一种指标，是由 L. S. Bowen 于 1926 年提出：

$$\beta = \frac{H}{LE} \approx \frac{\rho c_p}{Lq} \times \frac{K_h}{K_w} \times \frac{\Delta T}{\Delta e} = \frac{\rho c_p}{0.622L} \times \frac{K_h}{K_w} \times \frac{\Delta T}{\Delta e} \tag{4-28}$$

式中　β 为鲍恩比；p 大气压；c_p 为定压比热；L 为蒸发潜热；q 为比湿；K_h 为热量交换系数，K_w 为水汽交换系数；ΔT 和 Δe 为活动面上方 2 层高度之间的温度差和水汽压差。

在计算 β 时通常假定 $K_h = K_w$，并选用 0.5 m 和 2 m 或 0.2 m 和 1.5 m 2 层高度上的 ΔT，Δe 计算，则 $\beta \approx 0.5(\frac{T_1 - T_2}{e_1 - e_2})$。

当 $\beta > 1$ 时，$H > LE$，常出现在干燥地面上，输送到大气中的热量以显热为主，贴地气层气温较高；当 $\beta < 1$ 时，$LE > H$，进入大气的热量以潜热为主，它只能增加大气湿度，而不直接对低层大气增温，贴地层气温较低，湿度较高；当 $\beta < 0$ 时，LE 与 H 通量方向相反，夜间常出现这类情况，显热通量向下，蒸发继续进行，LE 向上。

一般情况下，热带海洋 $\beta = 0.1$，热带潮湿森林 β 为0.1～0.3，温带森林和草地为 0.4～0.8，半干燥地区 2.0～6.0，沙漠 $\beta > 10.0$。

(四)蒸散

蒸散是活动面与大气之间水分传输的一种重要途径，也是潜热交换的水汽扩散过程。蒸散包括蒸发和蒸腾两部分。水分子从液态或固态(土壤)水表面逸出而变成气态的过程或现象称为“蒸

发”；作物体内水分从表面以气态水的形式向外界大气输送的过程称为“蒸腾”。

蒸散量的大小取决于气象条件和蒸散面的性质。大气压、太阳辐射、风速、风速垂直梯度、乱流交换、饱和差、温度垂直梯度等因子直接制约着水汽输送速度；水面、冰面、雪面、土壤、植被等不同的下垫面对蒸散速率也有很大的影响。其单位为 mm/d。

蒸散是下垫面能量平衡方程中的一项重要参数，也是农业小气候、农业气候主要研究内容之一，对于探讨农田水分循环、制定农业气候区划、实施农田灌溉等都具有十分重要的意义。由于影响蒸散的因素较多、过程较复杂，不少学者从不同方面提出多种估算蒸散的微气象方法。

1.质量输送法

道尔顿(1800)将蒸发简单地作为水汽函数：

$$E = C(e_0 - e_a)$$

式中 E 为蒸发量；C 是与风速等因子有关的经验常数；e_0 为下垫面水汽压；e_a 为空气水汽压。

Penman(1948)将道尔顿公式改进为：

$$E = 0.4(e_0 - e_a)(1 + 0.17u_2) \qquad (4-29)$$

式中 u_2 是 2 m 处的风速。

这种方法多用于水面(水库、蒸发器)计算蒸发量。

2.空气动力学方法(梯度法)

Thornthwaite 和 Holzman(1942)根据空气的动力学原理，并假定 $K_m = K_w = K$，用比湿梯度和风的对数廓线估算蒸发：

$$E = \rho K^2 \frac{(q_2 - q_1)(u_2 - u_1)}{(\ln \frac{Z_2}{Z_1})^2} \qquad (4-30)$$

式中 q 为比湿；u 为风速；Z 为高度；K 为乱流系数，可为 K_m 或 K_w，其中 K_m 为动量交换系数(见后面介绍)，K_w 为水汽交换系

数。

在粗糙的作物表面上，用$(Z-d)$代替式(4-30)中的Z，d为零面位移(即湍流交换开始活跃的基准面，又称地面修正值)。

3. 涡度相关法(乱流交换法)

Swinbank(1951)提出用涡度相关法估算水汽垂直通量。

$$E = \frac{\varepsilon}{p}\rho\overline{W'e'} \qquad (4-31)$$

式中 W为垂直速度；e为水汽压；p为大气压，符号"—"为平均值，"′"表示与平均值的瞬时偏差；ε为水汽和空气的物质的量之比。

这种方法需要采用高精度的超声风速计，测定风速垂直速度的瞬时量。

4. 鲍恩比法(能量平衡法)

根据鲍恩比、显热通量、潜热通量表达式(4-28)

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\rho c_p}{0.622L} \times \frac{K_h}{K_w} \times \frac{\Delta T}{\Delta e}$$

和能量平衡方程(4-1)

$$R = Q_s + H + LE$$

并假定$K_h = K_w$，则可得

$$LE = \frac{R - Q_s}{1 + \beta} \qquad (4-32)$$

这是一种常用的计算蒸散量LE的方法，只根据2个高度的温、湿度观测资料，就很容易求出β，再由净辐射R和土壤热通量Q_s计算出LE。

5. 阻力法

Monteith(1963)利用阻力相似原理，提出农田水汽传输与蒸发面到空气的水汽压梯度成正比，和空气及叶片对水分子扩散阻力成反比。

$$LE = \frac{\rho L\varepsilon(e_s - e_a)}{p(r_a + r_s)} \qquad (4-33)$$

式中 r_s 是叶片气孔阻力(1－20 s/cm)；r_a 是空气阻力(0.1－2 s/cm)；ε 为水汽和空气的物质的量的比值；p 为大气压；e_a 为空气水汽压。

Blad 和 Rosenberg(1974)将天气条件和作物对潜热通量的阻力模式结合，得出

$$LE = \frac{T_a - T_c}{r_a} c_p \rho + R - Q_s \qquad (4-34)$$

式中 T_a 气温；T_c 作物温度(用红外测温仪测定)；r_a 空气阻力；R 净辐射；Q_s 土壤热通量。

6. Penman 方法

H. L. Penman(1948)提出在开阔水面上的蒸发量 E_0 的半经验半理论公式：

$$E_0 = (\Delta \frac{p}{L} \gamma E_a)/(\Delta + \gamma) \qquad (4-35)$$

式中 $\Delta = de_a/dt$，其中 e_a 为饱和水汽压，t 为温度，Δ 为饱和水汽压－温度曲线的斜率；$\gamma = c_p p/0.622$，为干湿常数，其中 p 大气压，c_p 空气定压比热；E_a 空气干燥率，$E_a = (E_a - E_d)f(u)$，E_d 为实际水气压，$f(u)$为道尔顿公式中的风速函数；L 为水的汽化潜热。联合国粮农组织根据各地试验资料，推荐一个修改的 Penman 公式：

$$ET_0 = C[W R_n + (1 - W) f(u)(c_a - c_d)] \qquad (4-36)$$

式中 $f(u) = 0.27(1 + \frac{u}{100})$；$u$ 为 24 h 风程(km/d)，C 为风速订正系数(昼夜风速差异的影响)；R_n 为净辐射；W 为温度权重；ET_0 为标准蒸散量(株高 8～15 cm、高度均一、土壤水分不短缺的绿色草面的蒸散量)，单位为 mm/d。

大田作物水分满足时的最大蒸散量 ET_m：

$$ET_m = K_y \cdot ET_0 \tag{4-37}$$

式中　K_y 为作物不同生育阶段缺水对产量的响应系数(由联合国粮农组织提供)。

五、动量输送

以乱流交换的方式输送动量的过程，称“动量输送”。除一部分因热力原因引起的乱流热量交换外，大多数乱流是由于下垫面对风的摩擦减速而产生的动量传输。这种摩擦减速，实际上是下垫面连续不断地从风中吸收动量(即质量×速度)的过程，而产生由气流到地面的连续向下的动量通量。

在农田中，动量交换的范围主要发生在作物群体到农田边界层顶之间。农田中的花粉、孢子等有机微粒，以及大气中的轻雾滴、烟雾、悬浮尘粒、农药等扩散传播，都受农田动量交换的影响。

(一)动量通量

$$\tau = -\rho K_m \frac{du}{dZ} \tag{4-38}$$

式中　τ 为动量通量；ρ 为空气密度；K_m 动量交换系数；u 为 Z 高度处的风速，$\frac{du}{dZ}$ 表示风速铅直梯度。一般情况下，$\frac{du}{dZ}>0$，则 $\tau<0$ (由大气指向地面)。

式(4－38)表明，动量通量与风速铅直梯度成正比，而风速铅直梯度的大小，取决于下垫面的粗糙度和下垫面有关的边界层高度。

在没有强烈热力作用的条件下，边界层的高度与下垫面粗糙度(即风速廓线上，平均风速为 0 的高度)有关。由于下垫面起伏不平或建筑物的影响，在风速廓线上，平均风速为 0 的位置往往不在地面，而在离地面的 Z_0 高度处。Z_0 即称为粗糙度。在平坦表

面 Z_0 接近于0，开阔水面或雪面 Z_0 在0.02～0.05 cm，无植被的地面 Z_0<1 cm，浅草地1～5 cm，作物地上 Z_0 约为株高的1/7～1/8。各种下垫面的粗糙度如表4-5。

表4-5 各种表面的粗糙度 Z_0

表面种类	Z_0(cm)	表面种类	Z_0(cm)
平坦泥浆地、冰面	0.001	平坦裸地	0.3～1.0
平坦雪地	0.005	休闲地	0.5～2.0
平静海面	0.02	短草地	1～2
疏松雪地	0.02～0.08	(草高5 cm以下)	
沙漠地面	0.03	禾木科作物	2～7

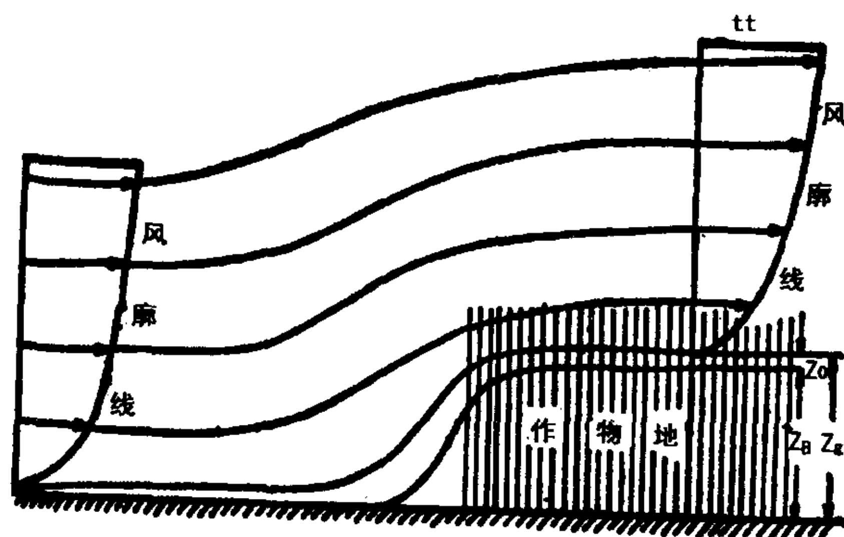


图4-9 气流通过高而密的草丛(作物地)时的示意图
Z_0 为粗糙度 Z_B 为零平面位移高度 Z_g 为活动层高度
(据A·P·康斯坦丁诺夫)

图4-9为不同风速廓线的边界高度。图中 Z_g 为边界层顶，在此高度以上风速几乎不随高度改变。边界层的厚度随 Z_0 的增加而增加，由图可见，平坦地面 Z_g < 300 m，郊外林地 Z_g 约400 m，城市中心受建筑物的影响，Z_g 约500 m。此外，平均风速铅垂梯度 $\frac{du}{dZ}$ 随 Z_0 的增加而减小，在平滑地面上 $\frac{du}{dZ}$ 最大，在粗糙度大

的市区$\frac{du}{dZ}$则较小。通常，当地表粗糙较小、边界层高较低时，风速铅直梯度大，故动量通量也较大。

式(4－28)还表明，动量通量的大小还与动量交换系数 K_m 密切相关。

（二）动量交换系数

动量交换系数 K_m 又称涡动扩散率或扩散系数，它与热量交换系数 K_h、水汽交换系数 K_w、CO_2 交换系数 K_c 等一样，统称为"乱流交换系数"(有动量、温度、水汽、CO_2 等差异)。乱流交换系数随地面状况和气象条件的变化而改变，通过动力作用或热力作用来影响乱流强度。当空气流经起伏不平的地表时，地面愈粗糙，乱流就愈强，乱流交换系数则愈大。例如，平滑湖面的乱流系数小于丘陵、森林、农田，浅草地和矮秆作物比高秆作物上的乱流系数小。通常，近地层风速随高度的增加而增大，K_m 较大，且风速愈大、动力乱流增强，K_m 就愈大，大气不稳定度愈强；热力对乱流作用增强，K_h 增大。根据·M. И. BYдbIko 提出的计算方法，乱流交换系数 K 可用下式表示：

$$K_{(Z)} = \frac{X^2 u_1}{\ln \frac{Z_1}{Z_0}} \left(1 - \ln \frac{Z_1}{Z_0} \times \frac{T_1 - T_0}{u^2}\right) Z \qquad (4-39)$$

式中　$K_{(Z)}$为离地面 Z 高度处乱流系数；X 为卡门常数(平均 0.4)，u_1 为 Z_1 高度处的平均风速；Z_0 为地面粗糙度高度；T_1 和 T_0 分别为 Z_1 和 Z_0 高度上的气温。

在无热力对乱流的条件下，$T_1 = T_0$，则动量交换系数 K_m 为：

$$K_m = \frac{X^2 u_1}{\ln \frac{Z_1}{Z_0}} Z \qquad (4-40)$$

K_m 随风速和粗糙度的增加而增大。

乱流交换系数具有明显的日变化。夏季、晴天、干燥地面上

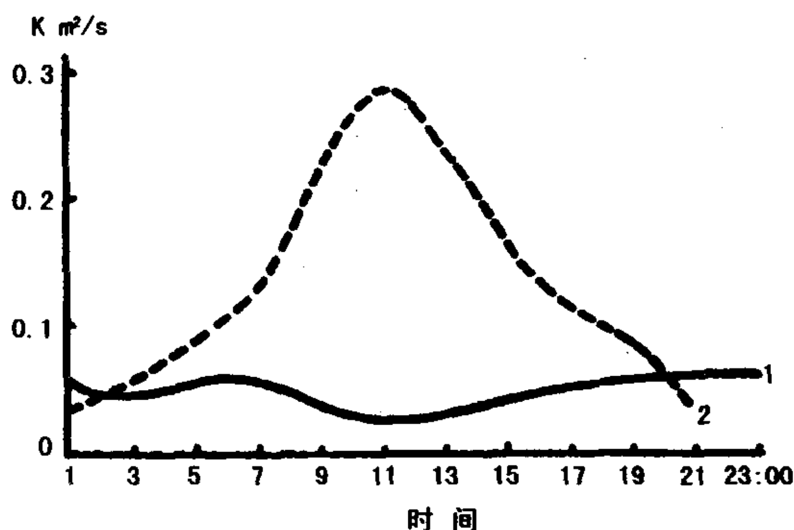


图 4－10 塞凡湖水面上(1)和陆面上(2)乱流交换系数的日变化

(据 M·Π·齐莫菲也夫)

K 值日变幅更大，最大值出现在午后，最小值在夜间或清晨。冬季、阴雨天、大风天、湿润的下垫面上 K 的日变幅较小，且无明显的变化规律。水面和陆面正好相反(图 4－10)，白天水面不断蒸发，层结比较稳定，K 较小；夜间水面蒸发减弱或停止，层结不稳定，K 较大。

近地层的风速日变化形式与乱流交换日变化完全一致。白天乱流加强，地面风速增加，午后最大。随后乱流减弱，风速减小，夜间风速很小，直至清晨。

第二节 农业小气候的类型及基本特征

一、农田小气候

农田小气候主要是由于农田中各种作物群体结构(种类、品种、生育状况、栽培管理措施)不同而形成的局地小气候。农田小气候在作物各个生育时期中，在短时期内，在相似的天气条件下具有一定规律的变化特征，从而形成特有的农田小气候条件。这些条件对作物生长发育、光合生产、病虫害的发生和消长，都会产生直接的影响。因此，研究农田小气候形成的物理基础，了解农田小

气候要素分布规律及其变化特征,对利用、调节、改善作物生长环境条件,提高作物产量和品质,都有重要实际意义。

(一)农田太阳辐射分布和辐射平衡

太阳辐射在农田作物层中的传播,大体符合郎伯—比尔(Lambert - Beer)定律,呈指数向下递减。叶面积密度愈大,辐射递减愈烈。

$$Q_Z \approx Q_0 \exp[-K\int_0^Z A_{(Z)} dZ] \quad (4-41)$$

式中　Q_0 为到达作物层上表面的总辐射;Q_Z 为离上表面 Z 深度的总辐射量;K 为作物对总辐射的削减系数;$A_{(Z)}$ 为 Z 高度处的叶面积密度。

农田辐射平衡(净辐射)即农田短波辐射和长波辐射收支差额,是农田中最重要的能量通量。对于单叶片和作物层,有不同的辐射平衡方程。

叶片辐射平衡方程为:

$$R = R_S + R_L \approx (K_l + K_b)(1 - \alpha - \tau) + 3.60\sigma T_l^3 (T_a + T_s - 2T_l) \quad (4-42)$$

式中　R 为叶片净辐射;R_S 为叶片短波净辐射;R_L 叶片长波净辐射;K_l 投射至叶上表面的短波辐射;K_b 为来自叶下表面的短波辐射;α 为叶下表面反射率;τ 为叶透射率,T_l、T_a、T_s 分别为叶温、气温和地面温度(K);σ 斯蒂芬—波尔兹曼常数(5.67×10^{-8} W/($m^2 \cdot K^4$))。

叶片净辐射的大小取决于来自叶片上、下方向的短波和长波辐射、叶片反射力、透射力、叶面温度、气温与地温。

作物层的辐射平衡由 3 部分组成:直接太阳辐射、散射太阳辐射及补充辐射。

(1)直接太阳辐射　进入作物层的直接太阳辐射穿过叶片缝隙,形成明亮的光斑。光斑面积随深度的增加而减小,光斑面积与

水平面积之比称“光斑面积比”，呈指数规律递减：

$$\frac{A_{(F)}}{A} = \exp(-KF) \qquad (4-43)$$

式中 $F=\int_0^Z A_{(Z)}\mathrm{d}Z$，称累积叶面积指数；$A_{(F)}$为作物层中与 F 相应高度上的光斑面积，A 为该高度上的水平面积；K 为以光斑面积递减为特征的削减系数（随叶倾角、叶方位角和太阳高度角、太阳方位角而改变）。

(2)散射太阳辐射　即穿过叶片缝隙没有受到叶丛影响的散射太阳辐射。其铅直分布与总辐射相似，呈指数下降。

$$D_F = \frac{D_0}{\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\exp(-K_{d(h)}F)\sin h\cos h\,\mathrm{d}h\,\mathrm{d}\phi \qquad (4-44)$$

式中 D_F 是累积叶面积指数 F 高度处水平面上的天空散射辐射；D_0 为作物层上方的天空散射辐射；$K_{d(h)}$是天空散射辐射衰减系数（随叶倾角的增大而减小）；h 和 φ 分别是散射质点的高度角和方位角。

(3)补充辐射　由直接辐射、散射辐射投射到叶片和地面上而形成补充辐射，其向上部分的辐射即成为作物层的反射辐射。

由此可见，作物层中的辐射传输过程与入射辐射、作物辐射特性、地面辐射特性及作物群体结构有关。

表 4－6 为交城棉田、小麦田、水稻田辐射平衡各分量的日变化。表中 Q 为总辐射；R_k 为农田反射辐射；F 为有效辐射；B 为辐射平衡。此时（6 月 11～20 日）正值棉花 7～8 叶期，植被稀少（接近裸地）；小麦乳熟期，植被较密；水稻返青之后，植被较稀。由表 4－6 可见，中午 12:00 Q，R_k，F 和 B 各分量出现大值，其中辐射平衡以水稻田最大，小麦其次，棉田最小。夜间 3 种农田辐射平衡皆为负。

图 4－11 为小麦、水稻、棉花地辐射平衡的铅直分布。由图可见，白天农田辐射平衡廓线总趋势为由植被上层向下递减，靠近地

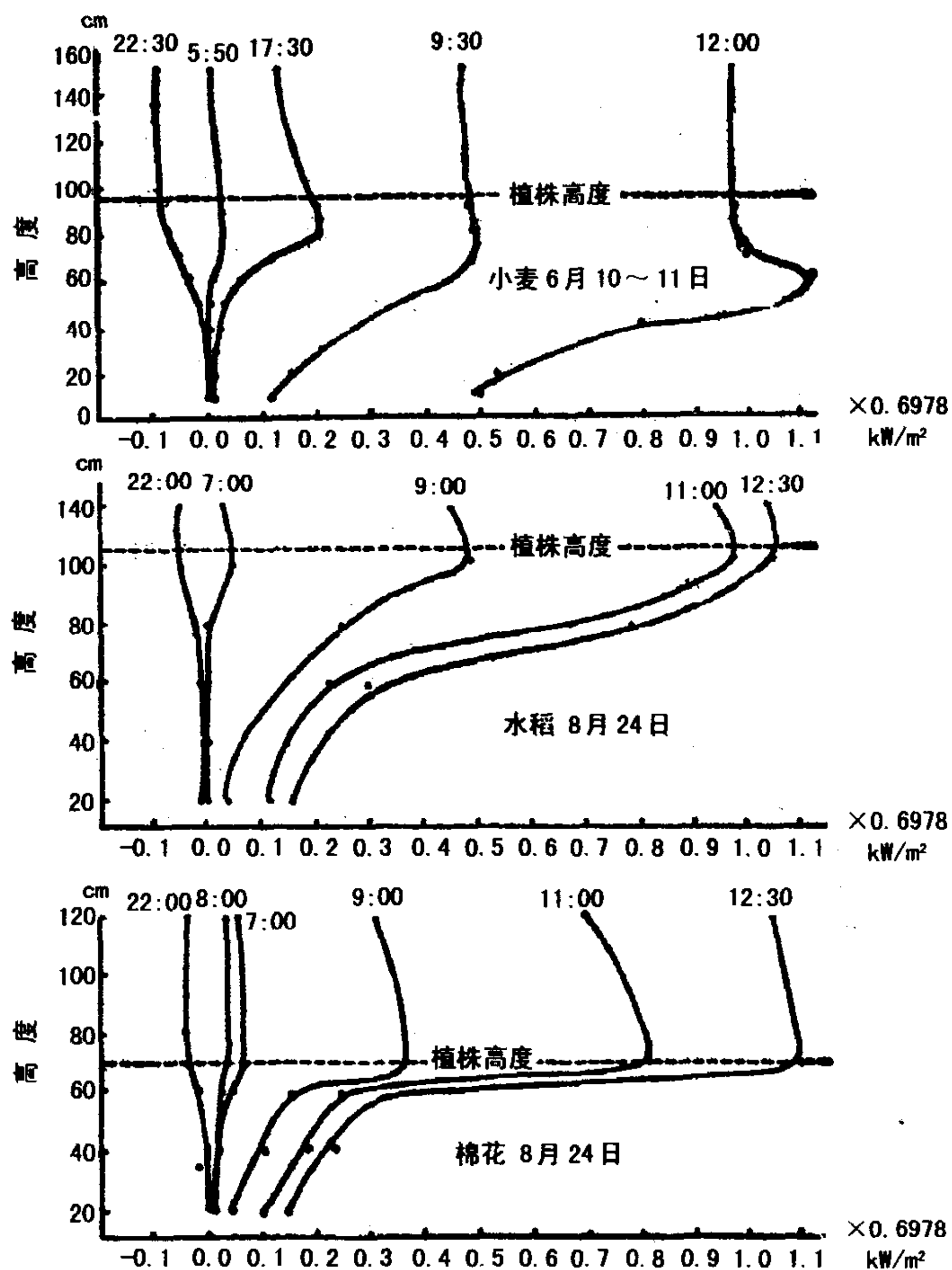


图 4－11　晴天各种农田中辐射平衡的铅直分布
交城广兴大队　1978

表最小；夜间廓线呈递增型，由植株上表面向下递减（有效辐射减小），茂密的植被下层辐射平衡趋于0，说明上层植被可隔绝植被下层与大气的长波交换，防止辐射降温。图4－11还表明，辐射平衡日变化振幅随高度的增高而增大。

表4－6 晴天时三种农田辐射平衡及期各分量的日变化（×0.697 8 kW/m²）交城1978年6月11日～20日平均

项目	田块 \ 时间	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00
Q		0.220	0.700	1.150	1.370	1.118
R_k	棉　田	0.055	0.134	0.207	0.230	0.192
	小麦田	0.050	0.120	0.156	0.170	0.152
	水稻田	0.065	0.110	0.131	0.145	0.132
F	棉　田	0.125	0.181	0.289	0.385	0.383
	小麦田	0.125	0.150	0.163	0.214	0.206
	水稻田	0.105	0.115	0.124	0.164	0.178
B	棉　田	0.040	0.385	0.654	0.755	0.615
	小麦田	0.045	0.430	0.831	0.986	0.832
	水稻田	0.050	0.472	0.895	1.061	0.885

项目	田块 \ 时间	16:00	18:00	20:00	22:00
Q		0.770	0.230		
R_k	棉　田	0.120	0.038		
	小麦田	0.118	0.046		
	水稻田	0.101	0.035		
F	棉　田	0.360	0.222	0.115	0.110
	水麦田	0.179	0.154	0.091	0.088
	水稻田	0.224	0.185	0.120	0.107
B	棉　田	0.290	−0.030	−0.115	−0.110
	水麦田	0.473	0.030	−0.091	−0.088
	水稻田	0.445	0.010	−0.120	−0.107

(二)农田温度分布与热量平衡

1.农田温度分布

农田中在作物层上方、作物层中、土壤和叶片的温度分布有不同的表现。

(1)作物层上方的温度分布

$$T_{(Z)} = T_0 \frac{H}{c_p \rho K U_*}[\ln(\frac{Z-d}{Z_0} - \varphi_h(\zeta)] \quad (4-45)$$

式中　$T_{(Z)}$为作物层上方任一高度 Z 处($Z \geqslant d+Z_0$)的温度;T_0 为 $d+Z_0$ 处的气温;H 显热通量[$cal/(cm^2 \cdot s)$],d 为零平面位移(cm);Z_0 为粗糙高度(cm);c_p 为定压比热;ρ 为空气密度;$U_* = (\frac{\iota}{\rho})$为摩擦速度(cm/s),$\iota$ 为动量通量;$\varphi_h(\zeta)$为层结订正项(通用函数)。

白天 $H>0$,温度随高度而降低;夜间 $H<0$,温度随高度而增加。

(2)作物层中的温度分布　受群体结构影响,因辐射和乱流交换的不同而异。白天作物层内气温低于裸地上方同高度的气温,夜间则相反。作物密度愈大,这种差异愈明显。在稀疏的作物层中,当乱流作用较强,辐射交换较弱时,作物层中温度昼夜都高于裸地同高度气温。

(3)土壤温度分布　有作物覆盖的农田,白天土壤表层(10 cm 以内)温度低于裸地。这种差异随作物密度增加而增大。夜间,直立叶能阻挡部分冷空气的下沉,其下面的土温高于裸地,而水平叶难以阻挡冷空气的下沉,其下面的土温可能低于裸地。在 10～20 cm 的土层中,作物覆盖下的土温低于裸地相当深度的土温,且这种差异随深度的增加而减小。土温日变化振幅作物地小于裸地。

(4)叶温　作物土层,白天叶温高于气温,夜间相反,晴天这种差异更明显。作物下层,白天叶温略低于气温,夜间叶、气温度接

近。叶气温差的大小与辐射、风速和湿度有关：太阳辐射强，差值大；风速大，差值小；湿度大，差值也小。

2.农田热量平衡

农田热量平衡有活动面热量平衡和作物层热量平衡2种。

(1)活动面热量平衡

$$R_a = P_a + LE_a + \iota A + Q_T + Q_c + Q_a \qquad (4-46)$$

式中 R_a 为农田活动面热量收入；P_a 为活动面与大气乱流显热交换；LE_a 活动面与大气间潜热交换；其中 E_a 为水汽通量，L 为蒸发(凝结)潜热；ιA 为通过作物生理过程将太阳能转化为生物能所消耗的辐射热量，A为单位时间、单位面积同化的 CO_2 重量即光合速率，ι 为同化单位重量 CO_2 所消耗的热量(2 500 cal/g)；Q_T 为植物与土壤的热交换；Q_c 叶片积累的热量；Q_a 为叶片与植株茎内热交换。其中 Q_c 与 Q_a 很小，光能利用率一般也>1%。图4-12为休闲地、小麦地和水稻田热量平衡示意图，可以看出休闲地热量平衡主要用于乱流交换(空气增温)，农田则主要用于蒸散耗

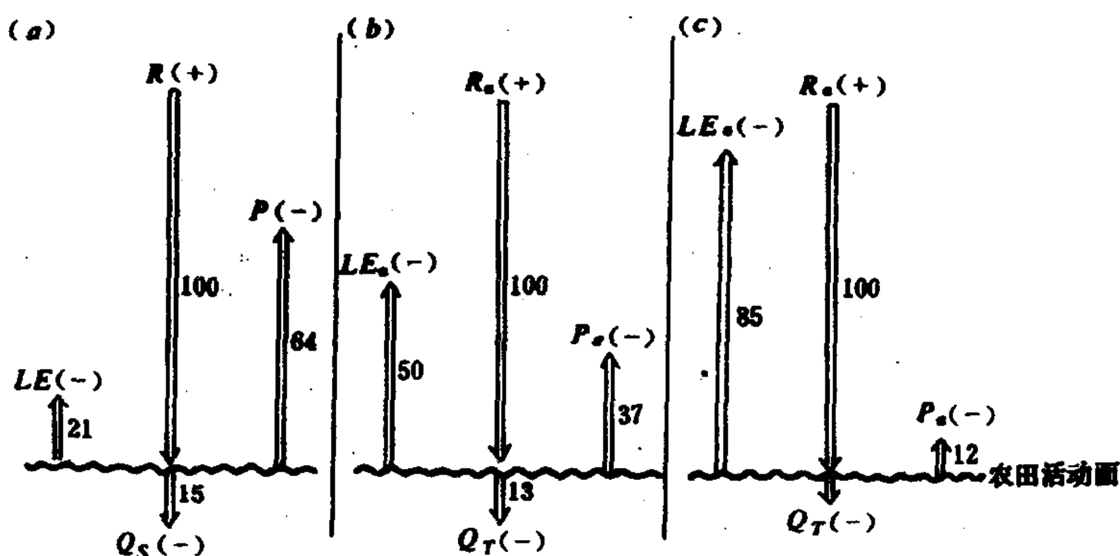


图4-12 农田活动面热量平衡示意图

(a)休闲地 (b)小麦地 (c)小稻田

热(稻田高于小麦地)。农田土壤热交换 Q_T 小于休闲地的 Q_s。

(2)作物层热量平衡

$$(R_1 - R_2) = L(E_1 - E_2) + (P_1 - P_2) + \iota A + (Q_v + Q_\theta) \qquad (4-47)$$

式中 R_1 为作物顶面的辐射平衡；R_2 为作物地面的辐射平衡；LE_1 为作物顶面蒸腾耗热；LE_2 为地面土壤蒸发耗热；P_1 为作物顶面积和大气间乱流热交换；P_2 为地面和作物层之间的乱流热交换；A 为光合作用所需的热量；Q_v 为作物层中因水汽随时间变化所贮存的热量；Q_θ 空气增温随时间变化所贮存的热量。其中绝大部分热量用于潜热交换和显热交换。

(三)农田风速分布和乱流交换

农田作物层中的能量与物质交换取决于作物层的乱流交换系数和风速。在作物层上方、内部和下部的风速有不同的分布形式(如图 4-13 所示)。受作物的阻挡和摩擦作用，靠近作物表面风速急剧减小，作物层之上风速随高度增加而增大。

1.作物层上方风速分布

对于较大面积作物生长均一的农田，在中性稳定条件下，其风速分布为：

$$U_{(Z)} = \frac{U_*}{\chi}\ln(\frac{Z-d}{Z_0}) \qquad (Z > H > Z_0 + d) \qquad (4-48)$$

式中 $U_{(Z)}$为 Z 高度处的风速；H 为作物层平均高度；U_* 为摩擦速度；χ 为卡曼常数(0.4)；d 为零平面位移；Z_0 为粗糙度。

2.作物层中风速分布

$$U_Z = U_{(H)}\exp[-a(1-\frac{Z}{H})] \qquad (Z \leqslant h) \quad (4-49)$$

式中 $U_{(H)}$为作物层平均高度 H 处的风速；a 为风速减弱系数(受作物密度影响)。

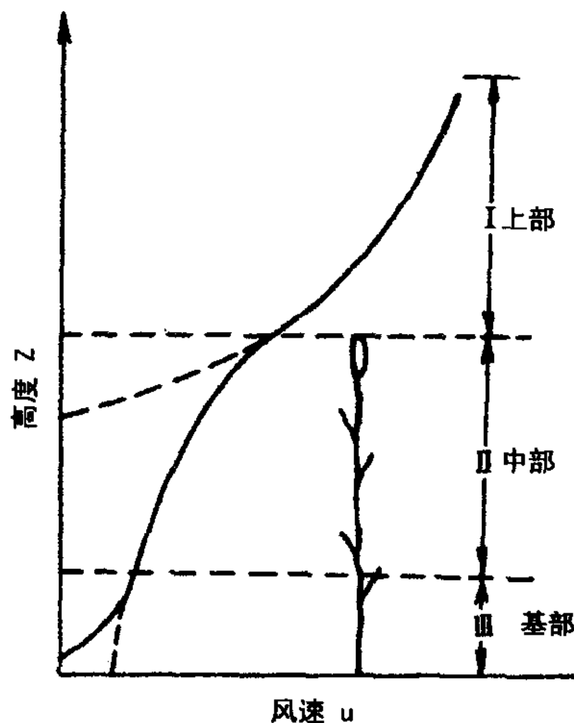


图 4-13　农田中风速垂直分布示意图

风速进入作物层，因植株摩擦消耗其动量，受作物密度垂直分布特征系数 a 的影响，风速逐渐减弱，上部和基部减弱较快，中部减弱较慢（图 4-13 中Ⅱ）。作物密度愈大，递减愈明显。

3. 作物层基部风速分布

贴近地表的作物层基部，茎叶稀疏，风速分布廓线与裸地相近，随离地表距离的增加呈对数增长（图 4-13 中Ⅲ）。但在农田边缘地段，受水平气流的作用，使作物基部出现风速次大值而形成 S 型风速分布。

农田中的乱流交换是植株间通风效应的重要指标之一。乱流交换的强弱取决于植株密度和高度，植株密度大、离地面距离低，则乱流交换弱，内岛（1962）用热量平衡法来描述农田作物层中的乱流交换。

$$K_{(Z)} = \frac{-(B_{(Z)} - Q_s)}{\rho c_p\left(\frac{d_T}{dZ} + \frac{L}{c_p} \times \frac{dq}{dZ}\right)} \qquad (4-50)$$

式中　K_Z为 Z 高度处的乱流交换系数；$B_{(Z)}$和$\frac{d_T}{dZ}$, $\frac{dq}{dZ}$分别是辐射平衡和气温、比湿的垂直梯度；Q_s 土壤热交换通量；ρ 为空气密度，c_p 为定压比热；L 为凝结潜热。

（四）农田湿度分布和水分平衡

农田中的湿度垂直分布为：

$$\rho_v = \rho_{v0} - \frac{E}{\chi U_*}[\ln(\frac{Z-d}{Z_0} - \varphi_q(\zeta)] \quad (Z > Z_0 + d) \tag{4-51}$$

式中 ρ_v 为 Z 高度处的水汽密度(g/cm^3);ρ_{v0}表示 $d+Z_0$ 处的水汽密度;E 为水汽通量($g/cm^2 \cdot s$);χ 为卡曼常数;U_*为摩擦速度;d 零平面位移;Z_0 为粗糙度;$\varphi_q(\zeta)$为层结订正项。

白天 $E<0$,农田作物层上方水汽密度随高度增加而减小;晚上 $E>0$,水汽密度随高度增高而增大。

农田空气湿度状况与农田蒸散、气温有关,作物层内土壤蒸发和作物蒸腾所释放出来的水汽,不易扩散(因植被内乱流交换较弱),湿度比裸地大,这种差异在晴朗的白天最为明显,夜间蒸散微弱,差异较小。

农田土壤湿度与裸地的差异与休闲作物密度有关。密植的农田,地表太阳辐射较小,蒸发弱,上层土壤湿度高于裸地;稀植的农田,土壤蒸发较大,上层土壤湿度低于裸地。

农田水分平衡,是指在作物根部范围一定深度的土层内水分收支差额,农田水分平衡方程为:

$$\Delta S = P + I + N - D - T - E - R \tag{4-52}$$

式中 ΔS 为某时段内土壤含水量的变化值;P 为降水量;I 为灌水量;N 为毛管水上升到该土层的水分;D 为渗漏到土层以下的水量;T 为作物蒸腾;E 为土壤蒸发;R 为地面径流。

农田水分平衡对农业生产和水资源的合理利用具有极重要的实用价值。例如估算土壤水分贮存量和农田水分平衡状况,可以作为作物产量预报的依据之一,用来制定农田灌溉计划,获得干旱程度指标,作为制定农业气候区划的依据等。

(五)农田 CO_2 分布和传输

CO_2 是作物进行光合作用、制造有机质的主要原料之一。农田中的 CO_2 主要靠大气和土壤通过乱流交换获得。农田 CO_2 通量为:

$$F_c = f K_c \frac{dc}{dZ} \qquad (4-53)$$

式中　F_c 为 CO_2 通量；K_c 为 CO_2 乱流交换系数；$\frac{dc}{dZ}$ 为 CO_2 浓度铅直梯度；f 为换算系数（1.97×10^{-3}g/cm^3）。通常 K_c 可以用不分属性的乱流交换系数 K 代替。

依欧(Inoue)和雷蒙(Lemon 1960)曾将上式变换为：

$$F_c = f \frac{\chi^2(u_2-u_1)(C_2-C_1)}{\ln(\frac{Z_2-d}{Z_1-d_2})} \qquad (4-54)$$

式中　u_1,u_2 分别为 Z_1,Z_2 高度上的平均风速；C_1,C_2 为该 Z_1,Z_2 高度上的 CO_2 浓度；d 为零平面位移；χ 为卡曼常数。

农田 CO_2 通量有明显的日变化和季节变化(图 4－14)。白天作物光合作用吸收大量的 CO_2，农田从大气中获得 CO_2 补充，通量为正；夜间作物呼吸作用放出 CO_2 送入大气，通量为负。受作物生长季节的影响，从 5 月至 7 月，作物叶面积不断增大，光合作用和呼吸作用日益增强，CO_2 通量日变化幅随之增大。8 月以后，作物生长速度逐渐减慢，CO_2 交换相应减弱。冬季的 CO_2 通量小于夏季，且日变幅化不甚明显。

农田 CO_2 浓度的垂直分布在作物层上方和植被内有所不同。

作物层上方的 CO_2 浓度：

$$C_{(Z)} = C_0 - \frac{P}{\chi U_*}\ln\frac{Z-d}{Z_0} \qquad (Z > d + Z_0) \quad (4-55)$$

式中　$C_{(Z)}$ 和 C_0 分别为 Z 和 $d+Z_0$ 高度上的 CO_2 浓度(g/cm^3)；P 为 CO_2 通量密度[g/(cm^2·s)]，白天为负，夜间为正；U_* 为摩擦速度；χ 为卡曼常数；d 为零平面位移；Z_0 粗糙高度。由于光合作用的日变化，导致作物层上方白天 CO_2 浓度低，夜间 CO_2 浓度高。

$$C_{(Z)} = C_{(H)} - \int_0^H \frac{P - \int_0^H f_L(Z')P_n(Z')dZ'}{K_{(Z')}}dZ' \quad (4-56)$$

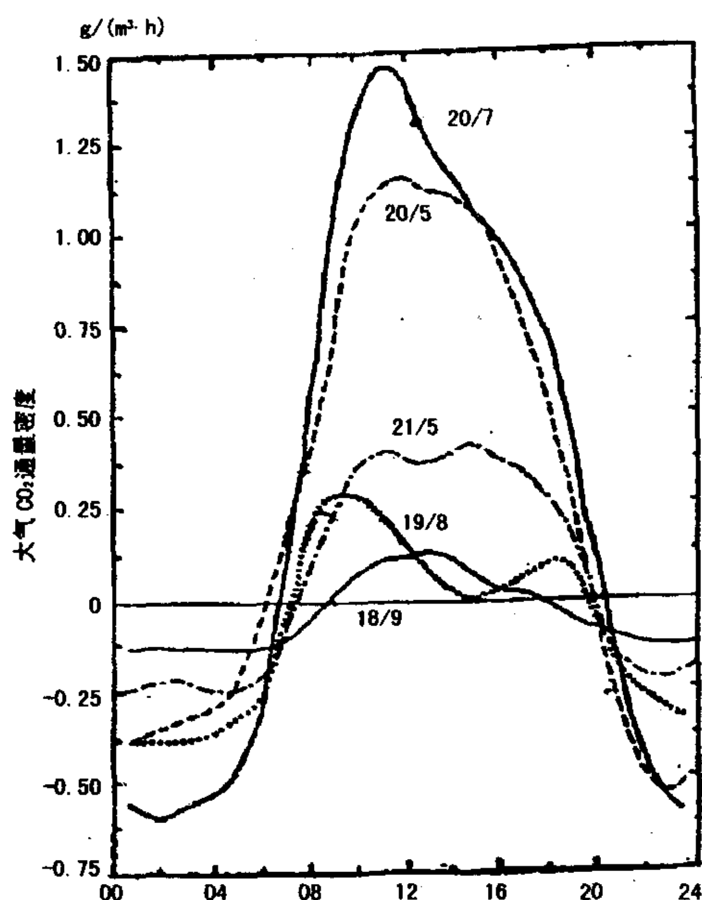


图 4－14　牧草地上生长季节逐日 CO_2 通量日变化(10 天平均)(据里普莱等)

式中　$C_{(H)}$为作物层上表面 CO_2 浓度；$f_L(Z')$为叶面积密度函数(cm^2/cm^3)；$P_n(Z')$为叶片净光合速率；$K_{Z'}$为扩散系数。白天作物光合作用吸收 CO_2，在作物层内出现一个低 CO_2 浓度层(此层的高度随叶片倾角和太阳高度角而变化)；夜间土壤和作物呼吸放出 CO_2，CO_2 浓度随离地表高度的增加而减小。

作物层内 CO_2 浓度的垂直分布因作物群体结构的差异，随乱流交换的强弱而产生很大的变化。

二、保护地(设施园艺)小气候

保护地小气候是指通过营建某些农业设施，避免或减少不利微气象因素对作物的影响所形成的有利于作物生长的农业小气候环境，即保护地小气候。例如，各种材料、形式和类别的温室(玻璃温室、塑料温室、日光温室、加温温室、塑料大棚等)、温床、阳畦、覆盖地(地膜、飘浮膜、秸秆、草帘等)、风障都属保护地小气候。由于温室内以栽培蔬菜、花卉、苗木为主，又称设施园艺小气候。

温室内的农业小气候环境(光、温、湿、风)与外界自然条件下的农业环境有很大的区别,它可以通过人工进行调节,形成独特的温室小气候。

(一)温室的太阳辐射和辐射平衡

太阳辐射是形成温室小气候最重要的因素。投射到温室上的太阳辐射不能全部透入温室,有一部分被温室覆盖材料(玻璃、透明塑料)表面反射和吸收。通常温室内的辐照度约为室外的50%～80%,影响温室光环境的主要因素是温室结构、覆盖材料的光学性质和作物的群体结构。温室中的光透过率主要决定于温室的形式、结构和覆盖材料的种类。一般南部和上部透光率较大,北部和下部透光率较小,冬季南北走向的玻璃温室直射光透光率比东西走向平均偏低5～10%,且温室长、高跨比小、纬度高的温室透光率较高;夏季南北长的温室透光率高于东西长的温室。温室顶部玻璃的坡度对透光率也有影响:东西长的透光在冬季随坡度的增加而显著增大,夏季却略有减小;南北长的温室无论冬夏,其透光率皆随坡度的增加而显著增大,夏季却略有减小;南北长的温室无论冬夏,其透光率皆随顶面坡度增大而减小。散射辐射透过率随顶面坡度减小而增大,地面中央高于四周5%～8%。另外温室结构的阴影对太阳辐射的透过率也有很大影响。

温室覆盖材料的光学性质对不同波段太阳光谱(光质)的透光率有所差异,从而影响到作物的生长和品质。例如,玻璃温室对300～400 nm的紫外线透过率很低,导致果菜着色差、味淡;对400～760 nm的可见光和800～2 000 nm的近红外线透过率达90%～92%,基本能满足作物对光的需求,对4500 nm以上的远红外长波辐射,几乎不能透过,因此具有较好的保温效果。新的聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)塑料温室对可见光和近红外线的透过率为85%～90%,对紫外线透过率高于玻璃温室,有利于育苗。

此外,太阳高度角的变化对覆盖材料的透射率和反射率也有明

显的影响，即随着太阳光入射角的增大，材料的透射率逐渐减小，反射率逐渐增大。例如，玻璃窗入射角为0°～40°时，反射率约7%～8%、透过率约83%～86%；当入射角为60°时，反射率约15%～16%、透过率约75%～78%。因此温室的方位、屋顶和墙角的倾角对温室内的光照都有不同程度的影响。

温室的辐射平衡包括温室外表面辐射平衡和温室内地面的辐射平衡。对于不加温温室有如下表达式：

覆盖外表面的辐射平衡 $R_{外}$：

$$R_{外} = \frac{1}{A_w}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} A_{ij}(Q_{ij} - Q_{rij} - F_{ij}) \qquad (4-57)$$

式中 A_w 为覆盖表面积；n、m 分别为不同坡度角和方位角的温室表面个数；Q_{ij}, Q_{rij}, F_{ij}分别为坡度角 i、方位角 j 的覆盖外表面 A_{ij} 的太阳总辐射、反射辐射和有效辐射的辐照度。

温室内地面的辐射平衡 $R_{内}$为：

$$R_{内} = \frac{Q\,\tau_m}{1+\beta_{内}\,\beta}(1-\beta) + h_r(t_{内} - t_{外}) \qquad (4-58)$$

式中 Q 为室外总辐射；β 为地面反射率；$\beta_{内}$为覆盖内表面的反射率；h_r 为长波辐射传热系数；$t_{内}$和 $t_{外}$为温室内表面和地面的温度；τ_m 为温室透光率(散射光0.5～0.7，直射光0.55～0.8)。

(二)温室的温度和热量平衡

温室的温度(加温温室除外)随外界气温而改变，具有明显的日变化和季节变化。对于不加温的密闭温室，白天室内外温差随太阳辐照度的增加而增大，晴天室内气温有时比室外高1倍以上，夜间通常高1～4℃，温室气温日较差大于室外。温室的温度状况取决于温室保温比、通风换气情况、潜热消耗和覆盖材料的辐射特性。保温比是指温室地表面积与温室表面面积之比，用以表示温室的保温能力。温室地表面积决定了白天所蓄热量，而外表面积则影响到夜间散出的热量，因此，保温比愈大(最大值为1)，表明温室保温能力

愈强。一般单栋温室的保温比为0.5～0.6,连栋温室为0.7～0.8。温室的覆盖材料是由透光和保温性能良好的玻璃、塑料薄膜、塑料板材构成,白天大部分太阳辐射能透过这些覆盖物进入温室,而地表及植物散出的长波辐射很少能透过覆盖层,这种“温室效应”具有较好的保温效果,特别在夜间,保温覆盖减少温室散热,不同的覆盖物比室外温度增加2～10℃。

温室内温度的垂直分布和水平分布不均,各部位间的温差高达5～8℃,白天地表温度高于气温,中部地表温度略高于四周。

温室热量平衡可用下式表示:

$$\Delta E = (Q_{s\tau} + q_h + q_r + q_a + q_b) - (q_{ac} + q_L + q_v + q_e + q_p + q_{sc}) \quad (4-59)$$

式中 ΔE 为温室热量收支差额;Q_s 为室外太阳总辐射;τ 为温室透光率;q_h 为温室加热负荷;q_r 为温室覆盖物内表面传入热量;q_a 为温室构件灯具、设备等附加辐射热量;q_b 为温室内土壤、植物呼吸释放热量;q_{ac} 为温室外表面通过对流热交换散出热量;q_l 为温室覆盖面向外散出的长波辐射热量;q_v 为通风换气的显热散热量;q_e 为植物和土壤蒸散潜热消耗热量;q_p 为植物光合作用吸收的热量;q_{sc} 为土壤向温室外的水平方向传导热量。

当 $E>0$,室内气温升高;$E<0$,气温降低;$E=0$,气温保持不变。白天太阳辐射是温室主要能源,太阳辐射投射到温室外表面,经覆盖面的反射、吸收,剩余的太阳辐射进入温室内,到达植物层和地表面,再通过地面和植物表面的反射及对流传导,将热量传送给空气,使室内气温升高。夜间太阳总辐射 Q_s 为0,温室覆盖面、植物表面和地表通过辐射、传导、对流向外散发热量,当室内温室低于作物生长所需适宜温度时,供暖系统启动,实时补充热量,延缓或减小室内的降温幅度。采暖温室的辐射平衡与热量平衡如图4-15所示。

(三)温室的湿度与水分输送

温室是一个较为密闭的环境,室内的湿度与外界有很大的差

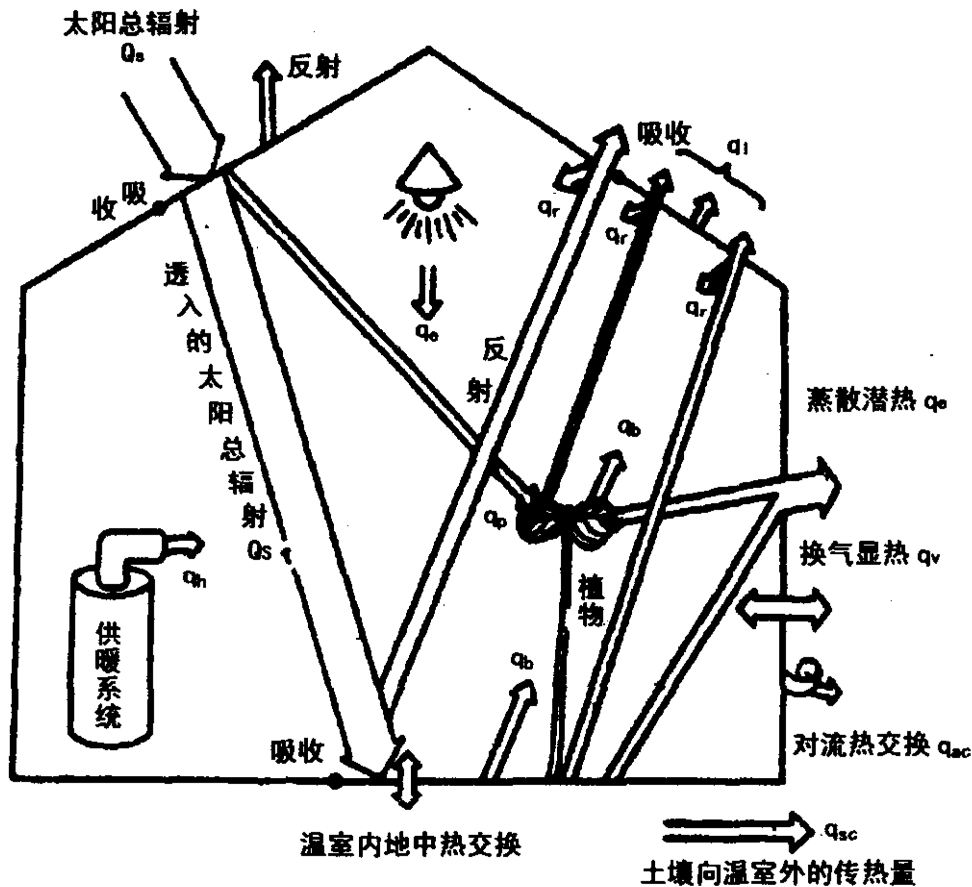


图 4-15 采暖温室的辐射平衡与热量平衡示意

异。温室的湿度主要取决于室内的温度、蒸散量、通风换气量及外界的天气条件。室内的蒸散量随土壤含水量、作物的生育状况及水分状况而变化,并与室内接受的太阳辐射量成正相关,因而呈现出明显的日变化。夜间湿度往往高达100%,日出后随着室内温度的上升,相对湿度逐渐下降,白天多为70%~80%,最小值常出现在14~15℃时,其变化幅度可达20%~40%。

过高的湿度,抑制作物蒸腾和光合作用,不利于作物生长,因此白天需进行通风(开窗)换气。

此外,温室的空气湿度还与温室的结构、大小及覆盖材料的种类有关。玻璃温室框架与玻璃间的缝隙所形成的室内外气流交换,对室内湿度有一定影响。塑料温室的密闭性能一般优于玻璃

温室，故其室内相对湿度也较玻璃温室高。高大的温室比矮小的温室更利于气流交换，室内空气湿度小，但局部湿度差异较大。矮小的温室空气湿度较高，但湿度分布较均匀。

(四)温室的 CO_2

温室中的 CO_2 浓度，是影响作物生长的重要环境因子。作物通过光合作用吸收空气中的 CO_2，放出 O_2，合成有机质。温室密封环境限制了与大气的 CO_2 交换，使得室内 CO_2 浓度不断减小，特别在光合作用较强的时段，因需消耗大量的 CO_2 而得不到补充之时，光合作用受阻，从而抑制作物的正常生长和发育。

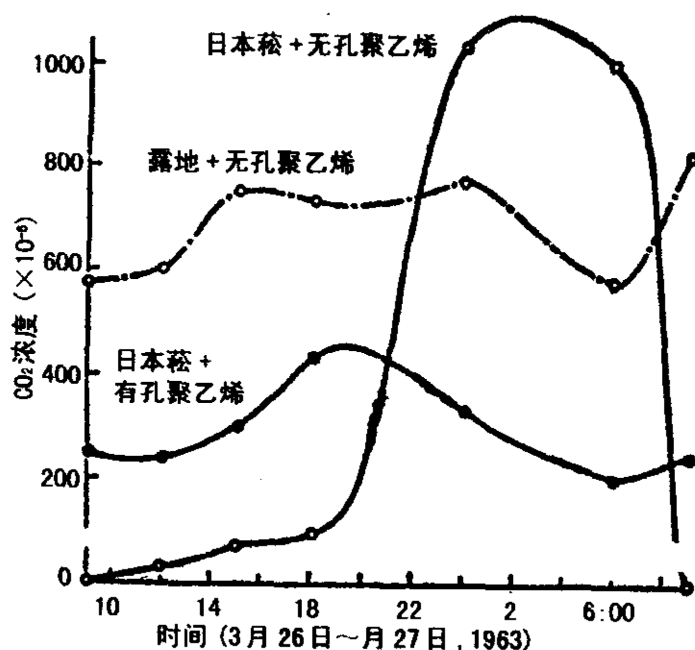


图 4－16　塑料小棚内 CO_2 浓度的日变化(金关　1968)

温室中的 CO_2 浓度有着明显的日变化。夜间作物呼吸释放 CO_2，同时土壤也释放部分 CO_2，使室内 CO_2 浓度维持在 $500\times10^{-6}\sim1\ 000\times10^{-6}$，日出前达到最大值，其后迅速下降，可降到 100×10^{-6}以下，接近作物 CO_2 补偿点(如图 4－16)，严重地影响到光合作用。因此，需及时进行通风换气，使室内的 CO_2 浓度水平保持在 300×10^{-6}左右，以维持正常的光合作用。在有条件的温室中，日出后 1 h 即可人工进行 CO_2 施肥，及时补充 CO_2，使 CO_2 浓度维持在较高的水平(800×10^{-6}左右，如图 4－17 所示)。大量实验表明，温室内增施 CO_2，可以促进作物生长、发育、提高产量和改善品质。肖进等(1996)在全

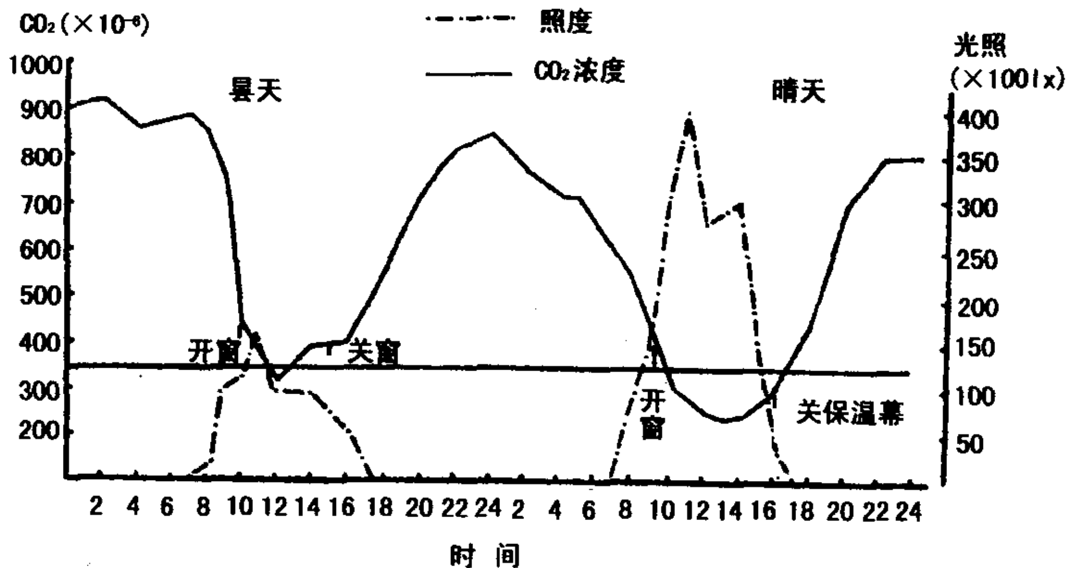


图 4－17 温室内 CO_2 浓度的日变化
(中国农业科学院蔬菜研究所 1981)

国 20 多个省、市、自治区，对蔬菜、花卉施用 CO_2 浓度 800×10^{-6} ～$1\ 000\times10^{-6}$，平均增产 50%左右。

(五)温室通风

温室通风的目的是为了降低室内温度、相对湿度、补充 CO_2 和 O_2 及排除有害气体。根据作物生长、发育对上述环境因子的要求，可进行温室自然通风和强制通风，使室内风速一般控制在 0.3～0.5 m/s。在高温、高湿、高光照条件下，风速以 0.5～1.0 m/s 为宜。

三、农业地形小气候

在同一大气候区内由地形因素作用形成的对农业生产有影响的局地小气候，称“农业地形小气候”。小范围的地理条件、地形因素如坡地、山谷、洼地、山岗和高地等，可形成不同的农业地形小气候条件。

(一)坡地小气候

坡地的方位(坡向和坡度)对小气候环境有不同的影响。

不同方位的坡地上每天的可能日照时数和所接受的太阳辐射量都有很大的差异。

这种差异随纬度和季节而变化。在我国，夏季南坡的可照时数一般比平地和北坡短，在冬半年与平地相同，但比北坡长。坡度对可照时数和天文太阳辐射通量的影响表现为：夏半年南坡坡度增加1°，相当于纬度降低1°；冬半年北坡坡度增加1°，相当于纬度升高1°。

直接太阳辐射　北半球夏半年低纬地区北坡接受的辐射最多，南坡最少，且随着坡度的增大，南坡接受的辐射量急剧减少，北坡接受的辐射量变化较小。在北回归线附近以东坡和西坡所接受的辐射最多，南坡其次，北坡最少。随着纬度的升高，接受辐射最多的坡向逐渐转向南坡；辐射量随坡度的变化在南坡也趋于缓和，而北坡则逐渐增大；南坡在一定的坡度范围内可获得比平地更多的辐射，而北坡获得的辐射比平地少，且随着坡度的增大，北坡接受的太阳辐射愈来愈少。冬半年则不同，任何纬度南坡的太阳辐射都最多，北坡最少，且纬度愈高、坡度愈大，南北坡相差也愈大。

温度　坡向上的太阳辐射差异，是形成不同方位坡地温差的主要原因。太阳辐射多的坡地温度高，太阳辐射少的坡地温度较低。坡地上的温度随坡向、坡度、季节和纬度而变化的规律与坡面上的辐射变化规律相似，在气候愈干燥、天气愈晴朗、植被愈稀少的情况下，不同方位坡面的温度差异愈明显。若加上地形引起的云雾和降水的作用，上述温差会在不同程度上有所加强或减弱。例如，在中纬地区相对高度差几十米至二三百米的中等坡度小地形，南坡的平均气温冬季比北坡高1～2℃，夏季偏高零点几摄氏度，东坡和西坡的温度介于南坡与北坡之间，且与平地接近。随着地形尺度增大，不同坡向温差也有所增大。冬季在冷平流的影响下，南北坡温差有时可达几摄氏度。不同坡面的土壤温度差异比气温差异更大。图4－18为冬季晴天10 cm深度不同坡向的土壤温

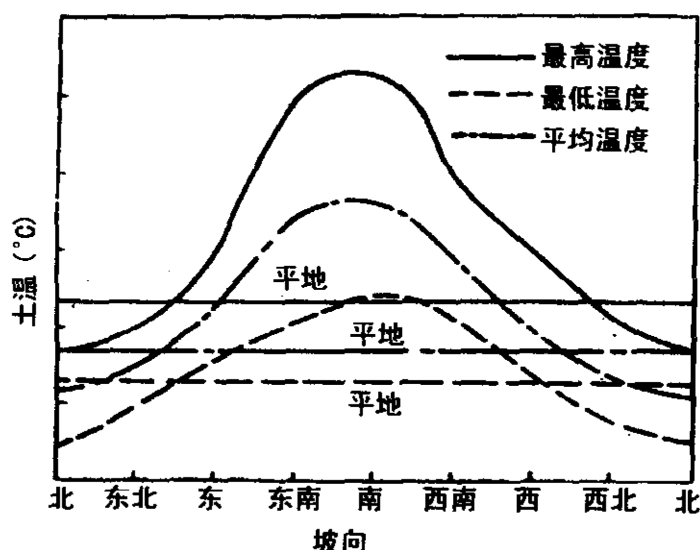


图 4-18　10 cm 深度的土温与坡向的关系
(南京方山,冬季晴天)

度,南坡的土壤平均温度比北坡高 4～6℃,比平地高 3～4℃;最高温度南坡比北坡高 7～8℃,最低温度比北坡高 3～5℃。

湿度　坡地方位对湿度的影响比较复杂,对于高度不大的小地形,降水量对其影响不大,其土壤湿度和空气湿度的差异主要取决于蒸发、降水分布和地面保水情况。坡地方位对土壤湿度的影响与对太阳辐射的影响相反,接受太阳辐射多、温度高的坡地,因蒸发强,土壤水分耗散快,故土壤湿度一般较小;接受太阳辐射少、温度低的坡地,因蒸发少,土壤水分消耗慢,故土壤湿度一般较大。坡地方位对空气湿度影响与当地的气候条件有关,在湿润气候下各坡向的土壤水分较充足,坡地的蒸发决定于接受太阳辐射的强弱,太阳辐射多,蒸发到空气中的水汽也多,空气湿度则较大;在干燥的气候条件下,接受太阳辐射多,蒸发能力虽强,但因土壤湿度低,实际蒸发到空气中的水汽却很少,空气湿度反比接受太阳辐射少、土壤湿度大的坡地还小。

由此可见,北半球南坡小气候的主要特点是:太阳辐射较强,温度较高,温差较大,冬季土壤冻结较浅、霜冻少而轻,蒸发能力较强、土壤湿度较低。北坡小气候的主要特点是:太阳辐射较弱,温度较低,温差较小,冬季土壤冻结较深、霜冻多而重,蒸发能力弱、土壤湿度较大。纬度愈高,南北坡向的小气候差异愈大,且冬季差异大于夏季。因此,在气候较湿润而温度条件不足的地区,南坡小

气候条件对作物生长有利,北坡最差。但在日射量丰富而水分不足的地区,北坡的小气候条件比南坡对作物生长更有利。

(二)山谷、盆地、洼地小气候

山谷、盆地、洼地等地形形态的差异,也会形成不同的小气候特征,其温度、湿度、风速等环境因子都因地形的起伏而变化。

温度　地形形态对温度的影响主要与天气条件有关。在辐射型天气条件下,环山围绕的谷地、盆地(洼地),由于风速小且乱流交换弱,有利于白天增温和夜间冷却。特别在夜间,周围山坡的冷空气沿山坡向下流动,汇集于山谷中,更加强了谷中的冷却,形成"冷湖"。在高地顶部和山坡上,风速较大,乱流较强,夜间地表附近的冷空气沿坡下流,在垂直交换的作用下,谷坡冷空气与谷中央暖空气交换的结果,使谷坡变暖。所以无论白天增温,或是夜间冷却,山坡都比谷地、盆地及其他避风低洼地暖和。谷地、洼地因白天气温高、夜间气温低,温度日较差大,辐射霜冻较重。高凸地、迎风坡白天气温低、夜间温度较高,温度日变幅较小,辐射霜冻较轻。在冷平流天气条件下,由于风速较大,降温较快,故低洼地和避风的地方昼夜温度都高于高凸地和迎风的坡面,平流霜冻也较轻。在纬度愈高、地面植被愈低矮稀少的情况下,地形对温度的影响愈大,且冬季的影响比夏季大。在较高纬度的地方,谷地、洼地冬季平均气温比平地低 2～10℃,无霜期比平地少 20～30 天;而高地、坡地平均气温比平地高 2～4℃,无霜期多 10～25 天。夏季各种地形平均气温与平地偏差 1～3℃,在较低纬度的地方,这些差异就变得很小;冬季仅差 1～2℃。

湿度　地形起伏的坡地上,降水易流失,一般土壤湿度较低;洼地、谷地,因周围坡地上的径流向下汇集,土壤湿度较高;高地顶部和梯田,地面比较平缓,径流较小,土壤湿度也较大。空气湿度与土壤湿度、风速和气温有关,一般谷地、盆地、洼地空气湿度较大,其湿度的日变化幅度也大;高地、坡地空气湿度较小,其湿度的

日变幅也小。据傅抱璞(1983)研究，在福建丘陵地区，在较开阔的谷地、盆地底部的农田比同海拔较高的开旷地1月平均气温低0.7℃，最低气温低1.2℃，年平均气温低0.5℃，大于10℃的积温少138℃，年日照时数少281 h，平均相对湿度偏高2%；在峡谷底部的山垄田，冬季平均气温比开阔谷地或盆地底部农田低1.0～1.5℃，最低气温低3℃以上，相对湿度高2%，初霜期早20多天。山垄走向不同，小气候也有差异，南北走向的山垄田1月平均气温和最低气温比东西走向的山垄田低0.3℃，平均土壤温度低2℃，相对湿度高6%。夏季山垄田的平均气温和最低气温比开阔谷地的农田低0.8℃，最高气温低1.1℃，相对湿度高4%。因此山垄田的产量较低。

风速　坡顶风速最大，侧风坡中部次之、向风坡再次之，背风坡和低洼地的底部风速最小。地形对风速影响的程度和距离是背风面大、向风面小。风向与河谷走向交角愈小，河谷内风速增强愈多。河谷愈深愈窄，河谷内风速减弱或增强愈大。在山地晴稳天气条件下，常出现山谷风和坡风。地形相对高度愈大，地面植被愈低矮稀少，山谷风和坡风也愈大。

降水　降水的分布一般是向风坡多，背风坡少。在小山岗和丘陵地的起伏地形中，高度差不大，对气流上升运动影响较小，降水分布主要受风的影响，风速大的地方降水少，风速小的地方降水多。

四、畜牧小气候

小气候条件对牲畜的生长、发育和繁殖有重要的影响。适宜的小气候环境能促进其生长发育，增强其对疾病的抵抗力；不利的环境使牲畜生长迟缓，发育不良，体弱多病，产量降低。

(一)牲畜生育与小气候

牲畜是恒温动物，当外界温度发生变化时可以通过调整畜体

热量平衡，适应外部的小气候环境。家畜的体尺随各地温度的降低而增大。一般情况下，同一种牲畜在北方气候寒冷地区体格较大，南方温暖地区体格较小。这是由于较冷的环境下体格较大的牲畜，其相对体表面积较小，有利于保温；炎热地区体格较小，其相对体表面积较大，有利于散热。家畜适宜的温度范围：羊 8～12℃、牛 5～24℃、马 0～25℃。

畜体的热量调节，还可以通过皮肤和呼吸进行水分蒸散消耗体内的热量。通常畜体蒸发耗热约占牲畜产热总量的 25%左右。当气温 30℃以上，畜体需加强水分蒸散来调节体温。这时若空气湿度小，有利于散热；空气湿度大，散热慢，畜体过热，易中暑。在寒冷的冬季，空气湿度越大，其热容量和导热率越大，牲畜在低温高湿环境下，显得愈加寒冷。空气湿度过大对牲畜不利，一般的适宜湿度为：牛＜85%、马＜80%、羊＜70%。

风对牲畜皮肤散热也有影响，影响的程度与温度和湿度环境有关。当气温低于皮肤温度时，风速大则散热快；当气温高于皮肤温度时，风速大反会使皮肤变热；当气温与肤温接近时，在有风比无风情况下牲畜稍感凉爽。风力 2～4 级的凉爽天气有利于牲畜的生长。

牲畜在阳光照射下，可将大部分太阳辐射能转化为体内的热能，并使其血液循环系统、中枢神经系统得到改善，提高牲畜的精神和灵活性，加强新陈代谢过程和对疾病的抵抗力，以及对气候环境的适应能力。多晒太阳，有利于牲畜的生长和发育。当然，过多的紫外线照射也会引起皮炎等皮肤疾病。

（二）放牧小气候

牲畜的饲养有放牧饲养和畜舍饲养。在牧区以放牧饲养为主，这就需要合理利用小气候条件，以达到高产优质。根据季节、温度、风向、霜露等气象条件，结合考虑水源、牧草生长和牲畜膘情等进行放牧，才能充分利用小气候资源。

首先需选择适宜的地段放牧。内蒙古牧民根据不同季节小气候特点总结出成功的经验:“春放阴,冬放阳,秋放圪垛、夏放岗”。晚春初夏先放牧于阴坡较枯干的草地,使牲畜从冬季采食干枯牧草逐渐转食青草;冬季严寒,阳坡辐射强,升温快,有较多的深草可供食用;秋季向阳的坡地雨水较充足、温度较高,牧草生长旺盛,有利于牲畜长“秋膘”;夏季选择地势较高、通风良好、接近水源的山岗,使牲畜在凉爽的环境中生活,还可避免暴雨的袭击。

其次安排好放牧时间。只要温度适宜,应尽量延长放牧时间。夏季早出、晚归,中午休息避开高温。为了充分利用夏秋黄金季节抓膘,有时需对马群进行夜间放牧。

还需采用科学的放牧方法,根据小气候因子日变化及季节变化规律,让牲畜吃饱、吃好,还要注意天气的突然变化,防止意外伤害。

(三)畜舍小气候

畜舍包括棚、圈、厩舍和畜禽场等各种形式。畜舍小气候直接或间接地影响到家畜的生命活动、生理机能、健康状况和生产水平。畜舍小气候条件与舍内的通风、光照、供暖、降温、粪污排除、饲料管理、畜禽种类、密度和年龄等有关。冬暖夏凉、干燥清洁、阳光充足、空气流通,是畜禽生育较为理想的小气候环境。

温度　畜舍的温度状况取决于舍内的热量来源和散失。热源来自于畜体、太阳辐射、流入的空气、供暖、粪肥和垫草发酵;热量支出为墙壁热传导、通风和蒸散耗热。一般舍内温度需保持在-5°~30℃之间(乳牛-5~27℃,猪0~28℃,蛋鸡5~30℃),适宜温度为10~24℃(乳牛10~15℃,成年猪15~21℃,蛋鸡13~24℃)。

湿度　畜舍空气中的水汽主要来自于畜体排出(占70%~75%),舍内潮湿(水)表面蒸发(占10%~25%)和进入空气中的水汽(占10%~15%)。水分的散失通过通风、排湿和外墙传湿。

家畜的适宜湿度为60%~70%，湿度范围为50%~80%。

风速　在自然通风条件下，畜舍内的风速取决于舍内温度分布和温差、外界风向和风速、门窗的大小和位置、内部设备的布置和操作管理。冬季舍内风速一般为0.1~0.3 m/s。对于机械通风，冬季畜体周围风速以0.1~0.2 m/s为宜。

光照　畜舍内一般以自然光照为主，人工光照为辅。舍内的光照和光照时间与纬度、季节、时间、天气、周围的地形地物、畜舍的式样、跨度、门窗、朝向、透光材料的种类和清洁度、畜舍内部设备的布置有关。人工光照畜舍内的光照和分布取决于发光材料、光源、墙和顶棚的颜色。人工光源的光谱组成与阳光不同，例如白炽灯红外线占60%~90%、可见光10%~40%（其中蓝紫光11%、黄绿光29%、橙红光60%）；荧光灯的可见光谱与自然光较接近，蓝紫光占16%、黄绿光39%、橙红光45%。

五、森林小气候

森林是气候的巨大调节器，特别是对小气候的影响更为显著。近地气层的大气物理过程被森林的生理、生态因子缓和了，在森林覆盖的地方表现出的小气候特征是：白天CO_2含量减小，O_2增加，太阳辐射减少，风速减小，气温日变化变缓，空气湿度和降水量增加。研究森林小气候对农业生产有着十分重要的意义。

（一）森林的小气候效应

1.森林的辐射效应

森林内存在2个活动层：林冠层和林地层。据高素华对橡胶林的气候研究，投射到胶林的太阳总辐射大部分为林冠层所吸收，吸收量占64%~68%，约有20%~22%被反射到林层冠上的大气层，仅有10%~16%透射到林地表面。林冠层对太阳辐射的减弱由上至下呈指数递减，至林高的2/3高度，即林冠层冠面至林地方向的1/3处，太阳总辐射减少20%~80%。

不同林冠与林地的反射率不同。胶林冠的反射率为20%～22%,次生林冠为22%～23%,茶树冠为12%～18%,裸地(白色粗砂为主)为28%。可见下垫面的特性对反射率的影响很大。

森林的有效辐射量有很大改变。胶林地和其他次生林地的有效辐射量为43～48 W/m^2,而空旷裸地可达121.9 W/m^2。

森林由于反射率和有效辐射小,因而净辐射值大。胶林冠和次生林冠的净辐射值晴天可达1 675.3×10^4～1 690.4×10^4 W/m^2,茶树冠为1 464.7×10^4 W/m^2,空旷地为1 142.8×10^4 W/m^2,林地旷地增加46%～48%(表4－7)。

表4－7 各类型净辐射比较 (单位:J/m^2)

场所	类型	总辐射(Q)	反射辐射(R_k)	反射率(a%)	有效辐射(e)	净辐射(R_0)	注
立才农场1984年4月15日晴	胶林冠	2 428.2×10^4	524.6×10^4	21.6	213.2×10^4	1 690.4×10^4	各项目总量均为日间值(白天总量)
	胶林地	272.5×10^4	150.8×10^4	38.8	218.6×10^4	－51.8×10^4	
	次生林冠	2 400.2×10^4	527.9×10^4	22.0	196.9×10^4	1 675.3×10^4	
	次生林地	187.3×10^4	40.5×10^4	21.7	155.5×10^4	－8.8×10^4	
海南所1984年4月20日晴	空旷地	2 241.7×10^4	649.2×10^4	29.0	449.8×10^4	1 142.8×10^4	
	胶茶林冠	2 087.9×10^4	426.8×10^4	20.4	253.7×10^4	1 407.4×10^4	
	纯茶林冠	2 098.8×10^4	317.6×10^4	17.7	262.5×10^4	1 464.7×10^4	
	胶茶地	312.7×10^4	122.5×10^4	30.2	87.4×10^4	102.8×10^4	
	空旷草地	2 064.9×10^4	369.1×10^4	17.9	517.5×10^4	1 178.3×10^4	
黎明农场1983年3月31日阴	胶林冠	628.7×10^4	133.3×10^4	21.2	211.9×10^4	283.4×10^4	
	胶林地	552.2×10^4	104.9×10^4	18.4	251.2×10^4	196.0×10^4	
	空旷草地	597.7×10^4	107.9×10^4	17.9	240.4×10^4	250.4×10^4	

翁笃鸣等观测到马尾松幼树林辐射平衡变化。林冠层的最大值出现在13:00前后,最小值出现在日出前,林地上20 cm处辐射平衡值比林冠处减弱,其日变化的曲线趋势与林冠处一致。夜间林地比林冠辐射平衡值稍高。形成这种现象的原因是由于白天到达林地面的总辐射比林冠的总辐射小,而夜间冠层对林地面的长

波辐射的阻挡减弱所致。

2.森林热量效应

由于森林对地表辐射平衡值、蒸散耗热、乱流交换的改变，其林内的热状况与无林地有显著不同。

由海南岛尖峰岭热带季雨林热量状况的研究得出如表4－8所示的结果。

表4－8 海南尖峰岭森林热量平衡各分量

季节	净辐射 R_n	蒸散耗热 LE	土壤热通量 G	植物体吸热 F	乱流交换 H	单位
旱季	1 047.4 100	133.6 12.8	70.9 6.8	24.8 2.4	818.0 78	J/(cm^2·d) %
雨季	741.2 100	608.2 82.1	42.5 5.7	11.5 1.5	79.1 10.7	J/(cm^2·d) %

由表4－8可见，在旱季热量主要消耗在乱流交换中，占净辐射量的78.0%，蒸散耗热只占12.8%，其余各项小于7%。雨季热量主要消耗在蒸散热上，占净辐射量的82.1%，乱流交换占10.7%，其余各项小于6%。

橡胶林热量收支中蒸散耗热是主要支出项，晴天约占净辐射的60%～75%，林冠蒸腾占其蒸散量的80%以上，空旷地的蒸发量只有胶林蒸散量的1/3～1/2。白天午后出现最大蒸散耗热值，约占48%～50%。

胶林湍流交换量小于蒸散耗热，约占净热量收入的25%～30%。土壤热通量约占净热量收入的5%～10%(表4－9)。

3.森林对气温的影响

由于森林辐射和热状况与其他性质的下垫面的状况不同，其生理作用亦不同，使林内与林外的温度有明显的差异。森林对温度影响最大的是日变化，白天林内温度明显低于林外，夜间林内高

于林外。从表 4 - 10 中可见，红松林内白天最高气温比林外低 2.7℃，而夜间阻止地面长波辐射的外散，林内气温高。

表 4 - 9 各作用层热量平衡各分量(J/m²)

站名	作用层	净热量收入 (R_0)	蒸散耗热 (LE_0)	湍流热通量 (V_0)	土壤热通量 (P)	注
立才农场 1984 年 4 月 14～15 日晴	胶林冠	$1\,595.1\times10^4$	$1\,125.3\times10^4$	404.6×10^4	65.2×10^4	各项均为一天总量值(包括夜间)
	胶林地	-74.8×10^4	66.9×10^4	-57.3×10^4	65.2×10^4	
	次生林冠	$1\,561.6\times10^4$	$1\,144.1\times10^4$	357.4×10^4	60.2×10^4	
	次生林地	-69.0×10^4	61.0×10^4	-52.3×10^4	69.4×10^4	
	空旷地	$1\,052.1\times10^4$	474.8×10^4	507.9×10^4		
海财所 1983 年 3 月 20～21 日晴	胶茶林冠	$1\,320.5\times10^4$	730.2×10^4	453.5×10^4	136.6×10^4	
	纯茶冠	$1\,369.8\times10^4$	795.5×10^4	437.2×10^4	136.7×10^4	
	胶茶地	117.9×10^4	51.8×10^4	-71.1×10^4	136.7×10^4	
	空旷草地	$1\,161.2\times10^4$	706.8×10^4	209.4×10^4	245.3×10^4	

表 4 - 10 小兴安岭红松林内与外的气温(℃)

气温	林内	林外	差值
日平均	17.0	17.4	-0.4
最高	25.4	28.1	-2.7
最低	10.4	8.7	1.7
日较差	15.0	19.4	-4.4

森林对全年气温的影响很明显。在小兴安岭红松林地测得结果，林内与林外气温差异显著。以 1 月代表冬季，4 月代表春季，7 月代表夏季，10 月代表秋季。地面最高温度林内 1 月为 -4.7℃，林外为 1.6℃；4 月林内为 31.8℃，林外为 27.1℃；7 月林内为 35.1℃，林外为 49.5℃；10 月林内为 27.5℃，林外为 29.7℃。地表最低温度林内 1 月为 -27.4℃，林外为 -39.3℃；4 月林内为

-9.3℃,林外为-8.8℃;7月林内为10.2℃,林外为-9.2℃;10月林内为11.5℃,林外-14.1℃(王正非 1975年)。林内与林外地面最高温度夏季差异最大,春秋差异小;地面最低温度冬季差异最大,其他各季差异小。由此可见森林对冬夏的冷热调节作用很显著。

4.森林对降水和蒸散的影响

森林对降水量的再分配不同于其他植被,通过截流、蒸散、径流形成森林水分循环系统。

在东北地区白桦林抬高了作用层,导致汽态水交换为主,液态水为次。在森林蒸散中物理蒸发可占总蒸散量的一半。水分循环各分量如表4-11。在海南岛尖峰岭测得如表4-12的结果。与东北地区相比,热带雨林的蒸散量小于温带林,而径流量则大于温带林。

表4-11 白桦林水分循环各分量的数值特征 (单位:mm)

项目 / 时间	降水输入水量			蒸散输出水量			
	P	P_t	P_s	E	E_t	$E_c=E_i$	E'
5~9月	619.5	435.2	23.6	538.7	292.5	160.7	85.8
%	100	70.3	3.8	87.0	47.2	25.9	13.8
3年	816.7	-	-	607.7	505.1	505.1	102.6
%	100	-	-	74.4	61.8	61.8	12.6

项目 / 时间	径流输出水量			系统蓄水变化				根系吸水
	R	R_s+R_i	R_g	ΔW	ΔS	ΔV	ΔL	
5~9月	149.8	73.6	76.2	-69.1	-70.6	1.0	0.5	294.0
%	24.2	11.9	12.3	-11.2	-11.4	0.16	0.04	47.5
3年	209.0	132.8	76.2	-	-	-	-	-
%	25.6	16.3	9.3	-	-	-	-	-

注 R_g用深层下渗水量替代。

表 4-12 尖峰岭热带半落叶季节雨林水量收支表 (单位:mm)

收支要素	收入				支出					
	T	S	I	P=T+S+I	F_1	F_2	F_3	$F_x=F_1+F_2+F_3$	E_x	E_x+F_x
年水量	1240.0	55.0	531.0	1826.0	11.30	610.40	30.20	651.90	915.5	1567.4
占年降水量比率(%)	67.91	3.01	29.08	100	0.62	33.43	1.65	35.70	50.1	85.8
收支要素	水存储量变化				误差					
	ΔW	L	ΔW+L	$P-E_x-F_x$	$\Delta=(\Delta W+L)=(P-E_x+F_x)$					
年水量	30.3	1.0	31.3	258.6	-228.3					
占年降水量比率(%)	1.66	0.06	1.72	14.2	-12.5					

注:T 为穿透水;S 为径流水;I 为截留水;F_1 为地表径流;F_2 为地中径流;F_3 为地下径流;E 为林冠上蒸散;ΔW 为土壤储水增量;L 为 A_0 层吸持水量。

(蒋有绪等,1991)

以上森林辐射和热量平衡、水分循环及对温度的影响与森林树种、类型和郁闭度等有关,不同的气候带也不同。

森林对小气候的影响是很大的。森林遭到破坏会出现不利的小气候变化,降水量特别是土壤水分减小,温度增高。南美洲亚马孙毁林对小气候影响如表 4-13 所示,从表中结果可看出保护森林对气候特别是小气候的改善是十分重要的。

(二)护田林的小气候效应

护田林带对改良农田小气候和作物产量有一定的作用。20 世纪 30 年代美国的干旱地区和黑风暴地区已广泛种植护田林带。

前苏联在30年代提出了大规模计划，在其南部和中亚一带种植护田林带，防止干旱风的危害。中国在80年代开展“三北”防护林带的建设，防止干旱化和荒漠化的扩大，相继在长江流域中上游建设水土保持林，防止水土流失。这些都对改善小气候，保护环境起到了重要作用。

表4-13 亚马孙地面各变量毁林和对照3年模拟结果

地面各表量因子	蒸发 mm/d	降水 mm/d	土壤水分 cm	径流 mm/d	净辐射 W/m²	温度 ℃	热量 w/m²	鲍恩比
对照	3.12	6.60	16.13	3.40	147.3	23.6	57.2	0.85
毁林	2.27	5.26	6.66	3.00	126.0	26.0	60.2	1.50
增减	-27.2%	-20.3%	-58.7%	-11.9%	-14.4%	+2.4	+5.2%	+76.5%

1.护田林带对小气候的影响

(1)护田林带对风速的影响　护田林带的首要作用是减小风速，大风不仅直接造成植株损伤，而且加大蒸散作用，加剧干旱的速度，种植护田林带能减轻和减弱这种作用。林带的防风作用取决于林带的高度、疏透度和长度，林带越高影响的垂直风向距离越远。一般紧密护田林顺风方向的防风作用是林高(H)距离的5～10H，疏透林的防风作用是林高的20～25 H。林带的长短对防风的作用不同，林带越长其影响越稳定。2种不同疏透度的林带其防风距离也不同，理想的疏透度是风速减弱到最小而影响的距离最远。因防风林设计要求在近地面处有最多的孔隙，林带的紧密度随高度的增加而增加，与风速廓线的自然对数成比例。林带不仅减小风速，更重要的是林带后面湍流运动的减弱，这对减少林带后面的土壤蒸发、防止土壤流失和保持积雪有重要的作用，而透风林带湍流交换系数小，防护作用更好。

(2)护田林带辐射平衡　护田林带影响辐射平衡的因素是树

冠的遮阴作用。在林带的影响范围内太阳辐射和净辐射明显降低，南北向的林带遮阴比东西向的林带遮阴面积小、时间短。南北向早晚遮阴的地段因上午或下午得到林带反射能量的补偿，遮阴地段与未遮阴地段的辐射平衡差异很小，对农田作物的影响可以不计。

(3)护田林带对温度、湿度、蒸散的影响　护田林带由于湍流交换和相应的作物冠层、土壤表面产生的感热通量降低，护田林带内的气温比空旷地高，无风夜间林带内比无林带地的气温要低。N·J·罗森堡等在内布拉斯加州夏末测得的结果，林带内比空旷无林带地气温高0.1～3.7℃；林带内的空气湿度和水汽压都较高，相对湿度比无林带地高1%～15%，水汽压比无林带地高0.9～6.7 hPa。

护田林带由于使风速和湍流交换减弱，土壤蒸发量减小。在无风的情况下，护田林内与无林带地段之间蒸散量差值小，但林带内蒸腾量大，实际用水量增加，而在有风的情况下，护田林的用水量减少。

2.护田林带对作物产量的影响

关于防护林带对农业是否有利，曾有过争议，因护田林带胁地造成作物明显减产，有的认为林带影响经济效益；另一些人通过实地大量研究证明，林带附近产量降低，但整个防护地段内每单位面积上的净产量仍然高过无林带地的产量，再加上林木产品的产值，其效益更大。因此，护田林带的种植一直作为保护农田的重要措施被采用。

护田林内改善了小气候状况，引起作物增产的主要原因：①一般情况下，因干旱胁迫而引起作物气孔关闭，造成萎蔫的情况减少，光合时间延长；夜间温度低而呼吸作用减弱，因而作物的 CO_2 净同化量增加。②林带对土壤水分蒸发减小而具保水作用，使水分更多地利用于蒸腾，提高了水分利用率。可见护田林带增产作

用是有其小气候和生理基础的。

美国对小麦的试验结果，护田林内每公顷多消耗 1 mm 水分就能增产约 16 kg。在前苏联高加索试验结果，透风林带下的冬小麦增产 300～6100 kg/hm^2，即增产 9%～16%。

我国的试验研究表明，护田林带对作物也有增产的效果。

据江爱良等研究，农田护田林网对小麦有增产的效果，而在离林高 1 倍(8～10 m)的距离内减产。一般林网占耕地面积的 3%～6%，而在林高 2～30 倍距离处增产，小麦总的增产 6%。

在半湿润地区对护田林网内棉花产量测定结果，林高 9 m，透风系数 0.4～0.5，林缘胁地影响的面积为林高的 1/2，约占林网总面积的 6.6%，而增产面积占 93.4%；试验林网面积为 13.2 hm^2，增产 2 640.62 kg，减去胁地减产损失，净增产率为 13.8%。

在干旱地区林高 6 m，透风系数 0.5～0.6 的林网内，小麦产量比无林网地增产 4.6%～20.4%，糜子增产 20.6%～66.8%。在风沙严重的干旱地区，林网的增产作用更显著，在自然灾害严重的地区和年份，小麦可增产 45%～117.6%；在自然灾害较轻的绿洲内，小麦增产 16%～29%。

护田林带对作物品质的影响也有利。作物蛋白质、油脂含量都有增加的趋势。

除上述农业小气候外，还有物料(农副产品)干燥小气候、水产养殖小气候、组织培养小气候等研究，国内外都取得不少进展。王修兰等通过对人参、西洋参、天麻、金针菇、猴头、生地、金荞麦等物料在不同温度、湿度、风速条件下的模拟实验，综合物料干燥特性、品质和能耗，获得了上述物料的最佳干燥环境(温、湿、风)指标。

第三节　农业小气候的调控和改善

一、农业小气候改善的意义

在自然界,自然环境在不断地变化,包括大气环境变化、下垫面的状况和特性变化,这些变化影响和改变着小气候环境。如干旱化问题,我国干旱地区,自19世纪末开始进入干旱和增温时期,特别是近几十年来干旱化趋势明显,冰川退缩、雪线上升、湖泊干枯或缩小,森林和植被减少,河川径流量减少等,都改变着下垫面的特性,影响着下垫面的辐射状况、粗糙度、反射率以及热量和水分平衡的各分量,使下垫面的局地环境小气候发生了极大的变化。这些说明自然条件变化改变了小气候环境。

人类活动也是造成小气候环境改变的重要因素。如草原垦荒造成沙化,局地草原小气候变为沙地小气候;水面的围堵,造成水体小气候变为农地小气候;森林砍伐,使森林小气候变为荒地小气候。近几十年来,由于工业化进程加快,大量废弃物排放,加之农药和化肥的大量施用等,引起了小气候资源质量下降,也影响了农业生产的发展。由上可见,农业小气候环境的变化是不可忽视的,其状况亟待改善。

由于农业小气候环境处在贴地气层,又与农田、林地、草地和人工环境等局地环境相连接,因而是可以改善的。同时由于调控技术的飞速发展,在技术手段方面也日益成为可能。

二、农业小气候改善的几种主要途径

(一)充分合理地利用农业小气候资源

(1)根据农业小气候特点,因地制宜,合理布局农业生产　虞静明等(1993)根据福建沙溪流域地形小气候效应,提出南坡和中

坡温度较高、无冻害,适宜种植柑橘;风向坡和山区海拔较高处多云雾,宜种茶、食用菌和药用植物;山顶风大、热量条件差,应注意植被保护、涵养水源、防止水土流失。李文(1993)根据武夷山和福建省寿宁县山区特点,指出武夷山南坡热量资源优于北坡,双季稻种植高度可上升 100 m,扩大了种植面积。寿宁县的南阳盆地越冬条件差,水分较丰富,适宜种植竹、油茶、茶等喜湿的经济林木和作物;而平溪盆地热量较丰富、降水适中,可种植梨、桃、李等喜温的果树,综合利用山区地形农业小气候资源。

(2)调整农业结构和种植方式,进行立体栽培,充分利用农田光热水条件　叶修祺(1993)在山东省嘉祥县采用了春马铃薯、春玉米、秋马铃薯、花椰菜一年 4 收的覆盖和套作小气候条件种植,即马铃薯地膜覆盖、套作夏玉米再套作花椰菜的立体栽培方法,这样玉米可为马铃薯遮阴降温,改善农田小气候状况,马铃薯和花椰菜可利用冷凉的小气候条件,玉米可利用温热的气候条件,既能充分利用农田光热资源,又可避免马铃薯高温热害,获得较高产量。杨文彬(1993)等采用地膜覆盖春小麦套种玉米的立体种植结构,改善了农田株间通风透光条件,减少了农田蒸发和盐碱聚积于土壤表面,提高了土壤有机质含量,实现了两作互利共生。

(二)采用有效的农业技术措施,防灾抗灾,改善农业小气候环境

(1)植树种草　通过植树种草,涵养水源,增加植被覆盖面积,减少地表径流和水土流失,蓄水保墒,防止和减轻旱、涝灾害。

(2)营造防风林、架设风障,减轻风灾和干热风危害　在风沙和干热风危害的黄淮海平原,实行粮桐间作,降低风速 20%～50%。防护林不但能减弱风速,还增加了农田湿度,降低了田间温度,调节并改善了农田光、热、水小气候状况,特别在风沙盐碱重、土壤贫瘠、灌溉条件差的地区防风林效果更佳。

(3)合理耕作,改良土壤结构　冬前松土、冬季耱麦、反复镇

压，使土壤上虚下实，提高土壤渗水能力，增加土壤热容量，提高土壤水分利用率，防止和减轻冻害。深耕、多施有机肥，改善土壤物理性状；开沟排水，降低土壤湿度和地下水位，防止湿害。在低洼地区进行台田种植，减少冻涝害。

（4）合理喷灌　初冬季节喷水、灌水，增加土壤热容量，减慢降温速率，防御霜冻。

（5）冻害预防　农田熏烟、覆盖（采用塑料薄膜或草、秸秆、土），可减少土壤空气热交换，保温防霜冻。

（三）设施农业微环境调控和自动管理

传感技术、自动化测量和控制技术的发展，以及计算机技术、信息技术在农业领域的应用和普及，大大推动了农业微环境自动调控和管理的进程，尤其是通过对设施农业小气候中单因子控制或多因子综合调控，可了解作物、环境、能源等诸多因素的互相作用和协同效应，获取各种作（动）物生育环境优化指标、措施和辅助决策，建立各类专家系统，直接指导当前农业生产和科学管理。农业微环境自动调控和生理技术在温室、塑料大棚、畜禽舍、蔬菜工厂、养殖厂等农业设施中的应用，实现了对不同要求的最佳环境组合与控制，为作物、蔬菜、畜禽、鱼虾提供了理想的生育环境，并获得优质高产的农副产品，已成为实现菜篮子工程的有力保证，为解决蔬菜淡季和周年均衡供应提供了良好的途径。

（1）微环境因子控制　根据作物生长要求，利用计算机指挥执行机构，对各种环境因素进行调控。英国 B. J. Bailcy 在番茄栽培中，利用控制保温膜（透明膜、镀铝薄膜）的覆盖时间改善温室的温度，白天高温时减少太阳辐射 21%～33%，夜间减少长波逆辐射使其增温，可节省 20%～41%的能源。日本 Kozai 研制了一套微机控制种苗繁殖和驯化装置，由计算机根据驯化曲线控制温度、湿度、光量、CO_2 浓度及营养液各种成分的浓度，提高了种苗成活率，缩短了育苗时间 30%～40%。

(2)作物生长模拟　利用计算机控制作物生长环境，建立作物生长—环境模型，再利用这些模型，根据当时环境实况来预测作物生育状况和产量。荷兰 H. Challa 等研制了一套作物—环境最佳模型，根据外部天气条件及温室内的作物特征函数、加热温度、通风速率、CO_2 供给速率等 19 种因子，进行最佳控制；根据实况、依据模型预测作物的生长量、生理量（光合和蒸腾）、产量和能耗。

(3)应用知识工程、专家系统进行科学管理　应用知识工程的方法总结特定领域专家的知识和经验，使之规则化、系统化，形成专家系统，对温室环境进行实时控制；根据预先建立的模型计算出作物的生长量、生理量，由专家系统进行诊断，提出建议和管理决策。在日本、美国已用于温室生产。

(4)植物工厂生产自动化　日本 CRIEPI 电力研究所的植物工厂，水培种植生菜、菠菜、千宝菜、番茄和黄瓜，由计算机控制温度、通风、补光、双层覆盖、喷灌和营养液循环，建成了育苗、移栽、收获、传送、清洗和包装自动化生产线。

第五章　农业气象灾害

第一节　旱　灾

旱灾是指因久晴无雨或少雨，降水量较常年同期降水量明显偏少，造成空气干燥，土壤干旱缺水，影响农作物正常生长发育而导致减产歉收的一种农业气象灾害。旱灾通常也称为干旱，但它与干旱气候不同。干旱气候是指多年平均的干湿状况。

旱灾不但能使农作物、树木、牧草生长发育不良，导致农业减产歉收，甚至绝收，还可使江河湖水减少，地下水位下降，河水断流，水井干涸，以至人、畜饮水都发生困难，酿成灾荒。我国受东亚大气环流和特殊的地理条件的影响，是个季风很显著的国家。每年夏季风来的迟早、推进的远近、势力强弱都不一样，造成降水量年际变化大，旱灾发生次数频繁、持续时间长、范围广、危害大。旱灾在全国各地都可能发生，是威胁国计民生的一种主要农业气象灾害 。根据历史记载，从公元前 206 年到 1949 年的 2 155 年中，发生旱灾达 1 056 次之多，平均每 2 年发生 1 次。我国北方的旱灾更为频繁，自 16 世纪以来的 400 年中，每 100 年发生的旱灾次数，少的 31 次，多的 91 次。每次旱灾都给人民带来沉重的苦难，在严重的旱灾年，大面积的农作物被旱死，“赤地千里，人食草根树皮”。清乾隆年间，北京曾连续 20 年(1741～1760)干旱，其中有 6 年达到大旱标准。长江流域虽然雨水丰沛，但旱灾仍很突出。1646～1649 年，四川连旱 4 年，出现“全蜀大饥，人相食”的惨象。1949 年以来，干旱发生的频率仍然很高，受旱面积也很大。据水利水电科学研究院统计，1950～1979 年全国平均每年受旱面积

1 960万 hm^2，占全国耕地总面积的 19.6%，其中受旱成灾(减产 30%以上)面积 673 万 hm^2，约占全国耕地总面积的 6.7%。1972 年是我国百年一遇的严重旱年，受旱面积 3 000 万 hm^2，华北、华中和西南地区在春旱之后，7 月份降水量又比常年减少 60%～90%，汉口、长沙、贵阳、太原、北京等地 6～8 月的降水量为 1951 年以来的最低值，不少地区水库干涸，河水断流，海河水位出现最低值，黄河在济南以下断流 20 天，许多地区人、畜饮水困难；夏播推迟到 7 月 20 日以后，大秋作物不能成熟，造成大范围严重减产，有些地方绝收。1965 年华北地区发生春、夏、秋 3 季连旱，内蒙古南部、甘肃河西、宁夏、陕西北部、山西、河北、北京、河南北部、山东西北部等地区 5～10 月的降水量只有 100～250 mm，均比常年少 5～7 成；河北的保定、沧州、衡水，山东的惠民以及山西的太原、休木等地连续两三个月未下透雨，沁河和南运河一度断流，人、畜饮水困难，土壤含水量一般在 10%以下，有的降到 5%，农作物受干旱危害非常严重。1978 年江淮流域发生严重干旱，降水量偏少 3～5 成，旱灾持续 3～5 个月之久，其中旱情最严重的安徽省，大片农田龟裂，不少秋季作物枯死，水稻、棉花、花生等作物大幅度减产，相当一部分县村人、畜饮水极困难。

一、旱灾的成因和类型

(一)旱灾的成因

大范围的严重旱灾是由大气流异常引起的。我国地处欧亚大陆东南部，东濒太平洋，受行星风系季节性位移和海陆冷、热源作用的影响，大部分地区属于季风区。冬季风来自西伯利亚一带，寒冷干燥；夏季风分别来自北太平洋和南印度洋副热带高气压(分别称为“东南季风”和“西南季风”)，温暖湿润。在冬、夏季风间的交锋区域，常常形成绵延数千千米、宽数百千米的季风(锋面)雨带。当夏季风的前缘(也就是极锋所在的位置)到达某地时，这里的雨

季也就开始了。所以我国各地雨季的迟早、长短和雨量的多少与夏季风的进退紧密相关。有些年份,夏季风来得很早或很强,而另一些年份,夏季风来得很晚或很弱。在这两种情况下,雨季开始的早晚、持续时间长短和雨量大小都会偏离正常情况而发生旱、涝灾害。

某地区长期持续少雨主要是由于该地区大气环流稳定少变,长期处在单一气团的控制中所致。我国大气环流异常导致少雨干旱有以下几种情况:①太平洋副热带高压(以下简称"副高")西伸并控制了华南和江南南部地区,来自北方的冷空气常在江淮流域与之相遇。这样,就在江淮流域形成多雨中心地带,而在被副高控制的华南和江南南部地区形成高温干旱天气,北方大部分地区因缺乏水汽来源,也形成少雨干旱天气;②副高呈带状西伸,但其脊线和北界位置偏南,这时冷暖气团在华南和江南南部交绥,形成多雨带,而缺乏水汽来源的华北地区和长江中下游地区为少雨干旱地区;③副高西伸北进,控制江淮及其以南地区,故南方少雨干旱,而北方由于冷暖空气强烈交绥,形成多雨带;④副高呈块状向西向北伸展,控制江淮流域,形成少雨干旱带,而北方和南方为多雨带;⑤副高强大,西伸北进控制我国东部地区,形成高温干旱天气。我国西部主要靠印缅槽从孟加拉湾带来的水汽与偏西路径的冷空气相互作用形成多雨区。这样就形成了东旱西涝的形势;⑥副高偏弱偏东,我国大部分地区因缺乏水汽来源而为少雨干旱天气。

(二)旱灾的类型

旱灾可按其发生的原因或发生的季节进行分类。按旱灾发生的原因分类,通常分为土壤干旱、大气干旱和生理干旱。土壤干旱发生在长期无雨或少雨的情况下,土壤含水量少、土壤颗粒对水分的吸力大,植物的根系难以从土壤中吸收到足够的水分来补偿蒸腾对水分的消耗,植株体内水分收支失去平衡,从而影响到生理活动的正常进行,植物生长受抑制,甚至枯死;大气干旱发生在太阳

辐射强，温度高、湿度低并伴有一定风力的天气条件下，植物蒸腾消耗的水分很多，即便土壤并不干旱，根系所吸收的水分也不足以补偿蒸腾失水，致使植物体内水分状况恶化，茎叶卷缩，甚至青干死亡；生理干旱是由于土壤环境条件不良，使根系的生理活动遇到障碍，导致植物体内水分失去平衡而发生的危害，例如土壤溶液浓度过高，致使植物根系吸水困难而发生生理干旱。

按干旱发生的季节，可把干旱分为春旱、夏旱、秋旱、冬旱和季节连旱。春旱是指发生在3～5月份的干旱。春季气温回升很快，空气干燥，太阳辐射强，风力较大，蒸发力很强，一旦春季长期无雨或降水量明显偏少，就会发生春旱。春旱影响春播作物播种出苗和越冬作物返青和生长发育。夏旱是指发生在6～8月份的干旱，通常分为初夏旱和伏旱。夏季太阳辐射强，气温高，大气蒸发力强。这时农作物已进入旺盛生长期，耗水量很大，一次较大的降水，也只能维持3～5天，便消耗殆尽。所以在夏季较长时间无雨或少雨天气，土壤含水量就会迅速减少而发生干旱。初夏旱不仅影响冬小麦灌浆成熟，还影响夏播作物及时播种。7～8月份是我国北方的雨季，也是大秋作物的需水关键期，伏旱不仅严重影响当年粮、棉作物产量，而且还影响水库的蓄水量和土壤墒底的形成，对来年的冬小麦和春播作物的生长及产量都有显著影响。秋旱是指发生在9～11月份的干旱。9月份以后，副热带高压迅速南退东撤，大陆雨季相继结束，降水量显著减少，而农田蒸发蒸腾量仍较大，如果秋季的降水量比常年偏少，就会发生秋旱。秋旱影响晚稻和秋作物灌浆成熟。在冬麦区，秋旱影响冬小麦播种出苗和苗期生长。冬旱是指发生在12～2月份的干旱。我国冬季为干冷的冬季风所控制，降水稀少，各地多以干旱为主。在北方，大部分农田休闲，越冬作物也处于休眠状态，所以冬旱对农作物的危害较轻。但在华南和西南地区，冬季温度较高，农作物还在生长，一旦降水较常年显著偏少，也会发生干旱危害。有些年份干旱持续时

间较长，出现连续2个季节以上的干旱，称为“季节连旱”。据统计，我国出现过春夏、夏秋、秋冬、冬春、春夏秋和全年连旱等6种季节连旱。季节连旱持续的时间长，对农业生产的危害也就比较重。大旱年一般都是季节连旱年。

二、旱灾的时空分布特征

(一)旱灾的地区分布特征

我国的旱灾多发生在东部多雨地区。因为我国东部地处东亚季风区，降水主要发生在冬、夏季风交绥的地区，各地雨季的迟早、长短和雨量的多少与夏季风进退、强弱紧密相关，降水集中于夏季。从南向北，雨季越来越短，降水集中的程度愈北愈高，而且年际变化大，旱灾也越来越多。表5-1从南到北列出了东部季风区6个台站的干旱月数和连旱次数，可以看出纬度对干旱的影响。

从表5-1可以看出，我国偏低纬度(20°～30°N)地区干旱月百分比较低(22%～24%)，连旱2个月、3个月的次数较少，30年内仅出现2～5次。中纬度(31°～40°N)地区干旱月数约为低纬度地区的2倍，百分比增至50%～65%，连旱2个月、3个月的次数达到7～17次，为低纬地区的3～8倍，还出现连旱5个月的大旱，这是低纬度地区所没有的。偏高纬度(41°N以北)地区的干旱月数、百分比及连旱次数比中纬度地区明显减少，与低纬度地区相近，在统计时段内，沈阳干旱月百分比为22%，未出现连旱现象。这种情况在历史上也曾出现过。徐瑞珍等把我国100°E以东地区分为5个纬度带，各分5个时段统计大范围干旱出现的频次(表5-2)，结果也表明，各时段低纬度干旱发生的次数较少，随着纬度增加，干旱次数增多，到35°～40°N达到最大值，40°N以北地区又减少。总的来看，在近500年中，北方出现大范围干旱的概率(几率)比南方大。

表5-1 干旱随纬度的变化

台站名	纬度	经度	海拔高度(m)	干旱月数		连旱次数				统计年月数
				月数	百分比(%)	2个月	3个月	4个月	5个月	
广州	23°08′	113°19′	6.3	86	24	2	2	0	0	30年,360个月
赣州	25°50′	114°50′	123.8	87	24	2	2	0	0	30年,360个月
武汉	30°38′	114°04′	23.3	80	22	5	2	0	0	30年,360个月
郑州	34°43′	113°39′	110.4	158	53	17	7	1	0	30年,300个月
德州	37°26′	116°19′	21.2	172	64	9	7	2	2	30年,270个月
沈阳	41°46′	123°26′	41.6	60	22	0	0	0	0	30年,270个月

表5-2 各纬度带各时段大范围干旱出现频次

时段(年) 纬度带	1470~1569	1570~1669	1670~1769	1770~1869	1870~1977
40°N以北	—	—	—	—	11
35°~40°N	13	15	7	11	17
30°~35°N	4	10	3	5	12
25°~30°N	7	8	3	4	8
25°N以南	—	—	—	—	9

我国北方特别是35°~40°N的华北地区,干旱频繁的根本原因是由于它位于东亚季风区的北部,每年夏季风来得迟,去得早,降水集中程度高,变率大,旱灾较多。位于41°N以北的东北地区,由于气旋活动较多,降水性质比较稳定,降水变率较小,加上纬度较高、气温较低、蒸发量较小,旱情比华北地区轻。

分区统计1950~1979年各地区受旱面积和成灾面积占全国受旱、成灾面积的百分数,以及占该区耕地面积的百分数,结果列

于表 5-3。

表 5-3　各地区受旱、成灾面积

地　区	受旱面积		成灾面积	
	占全国受旱面积(%)	占该区耕地面积(%)	占全国受旱面积(%)	占该区耕地面积(%)
黄淮海	46.5	30.1	50.5	11.3
长江中下游	22.0	20.5	19.2	6.1
东北	11.6	14.4	11.4	4.2
西北	4.7	11.3	5.1	6.3
华南	5.2	12.4	4.4	4.2
西南	10.0	17.1	9.4	5.6

从表 5-3 可以看出，黄淮海地区(包括冀、鲁、豫、晋、陕、内蒙古、京、津)受旱和成灾面积均占全国总数的一半左右，居全国首位；长江中下游地区(包括湘、鄂、赣、苏、浙、皖、沪)，占 20%左右；东北地区(包括辽、吉、黑)和西南地区(包括云、贵、川、渝)各占 10%上下；华南地区(包括粤、桂、闽、海南)和西北地区(包括甘、宁、新、青)各占 5%左右。各区受旱面积和成灾面积占该区耕地面积的百分数，也以黄淮海地区为最高。

根据中央抗旱办公室历年《旱情登记表》、有关部或局的《水利简报》、《旱情》、《农情》、《天气公报》、《历史天气图》及降水量资料统计，年平均受旱天数在 30 天以上地区主要有东北西部、黄淮海大部、四川盆地东北部和云贵高原。其中黄淮海地区的高值中心在海河平原，年平均受旱天数达 90 天以上；四川盆地东北部的高值区范围较小，中心在绵阳、南充、达县一带，多年平均受旱天数在 90 天以上；东北地区西部受旱天数超过 90 天的范围较大；云贵高原一带平均受旱天数在 40 天以下。

(二)旱灾的季节变化规律

我国幅员辽阔，各地气候和农业差异很大，在全国范围内，各

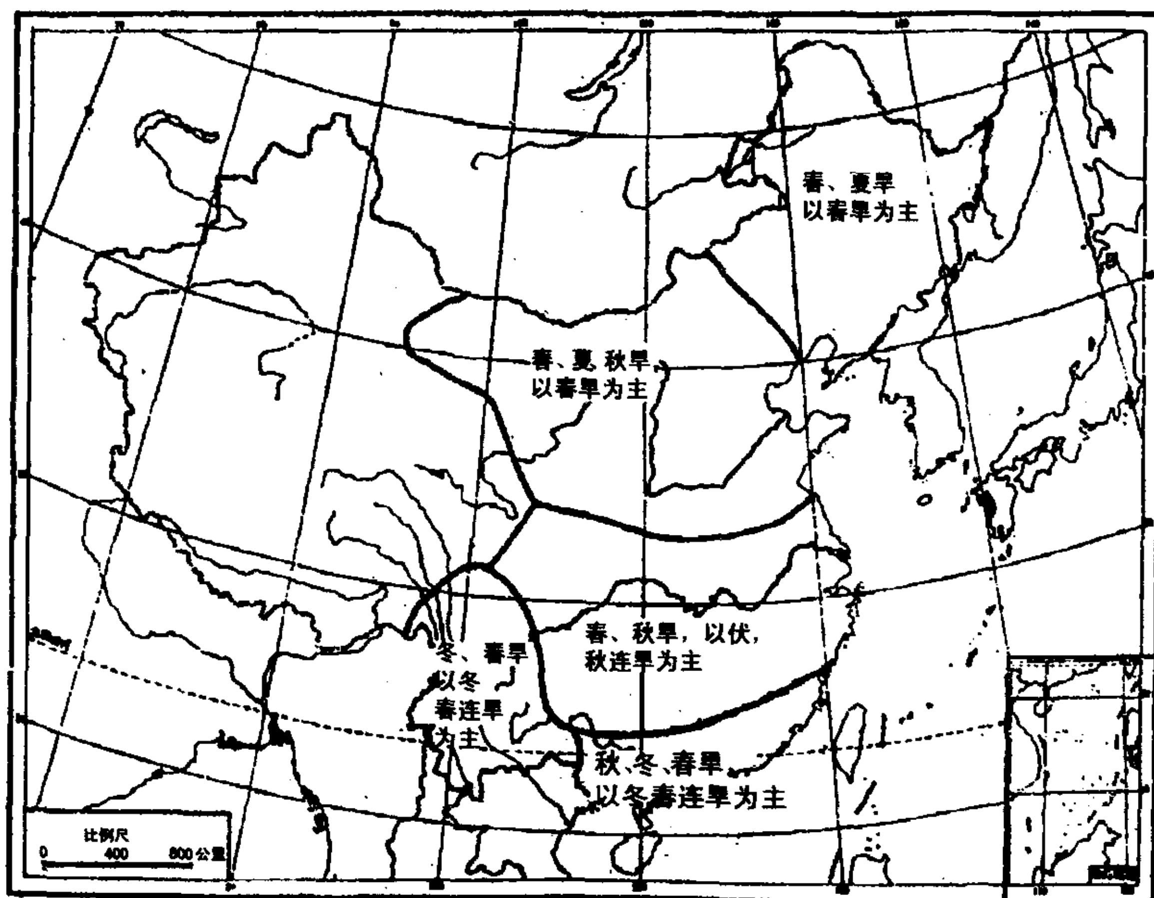


图 5－1 中国旱灾出现的季节

个季节都可能发生旱灾，但其地区分布规律各不相同(图 5－1)。

1.春旱

我国北方春季受极地大陆气团控制，天气晴朗，日照充足，空气干燥，且风多风大，蒸发强烈。但春季降水少、变率大，各月降水量均小于 50 mm，降水量远低于可能蒸发量，水分亏缺严重，常常发生春旱，素有“十年九春旱”之说。据统计，黄淮海流域在 30 年中有 26 年发生过不同范围的春旱，频率达到 87%，常常发生连年春旱，如 1970～1975 年连续 6 年发生春旱。东北地区西部春旱也很频繁，在 30 年中春季出现干旱的年份有 21 年，频率为 70%。在北方，春旱发生频率较高的地区有河北省南部、河南省北部、山东省中部和西部、晋中、晋西北、晋北以及辽宁省、吉林省、黑龙江

省3省的西部、内蒙古东部农业区。此外,陕北、陇中、宁南和青海东部农业区也是北方春旱较重的地区。

在我国南方,春旱主要发生在华南南部和西南地区。春季,华南静止锋位于南岭和长江之间,致使华南南部春季少雨,而春季温度上升迅速,蒸发力大,降水量小于蒸发力,春旱频繁。广东南部沿海、雷州半岛和海南岛的西南部,春旱频率可达90%以上,其中重春旱年占31%~63%,中等春旱占17%~38%,平均春旱日数为80~90天,个别地区达110天。广西中部和南部春旱发生频率为30%~50%,西部达70%~90%。西南地区春旱也比较频繁,云南省旱灾中春旱占70%以上。金沙江地区2~4月的月降水量常不足10 mm,而月蒸发力高达110~160 mm,干燥度大于5,是南方最严重的春旱区。四川盆地(1951~1972年)春旱频率为55%,严重春旱3~5年一遇,发生概率最高的地区是绵阳、简阳和威远一带。

2.夏旱

通常分为初夏旱和伏旱。初夏,西太平洋副热带高压脊线稳定在20°N附近,雨带在江淮流域,而我国北方降水仍然较少,而且气温高,蒸发力大,此时农田土壤含水量已下降到全年的最低点,形成初夏旱。初夏旱主要发生在甘肃中部、宁夏南部、关中东部、山西南部、河南中北部、河北南部和山东中部。旱象一般从5月中、下旬开始,到6月底或7月上旬解除,旱期平均30~40天,有的年份干旱持续到7月中、下旬,形成较重的初夏旱。我国南方有时也会发生初夏旱。在四川盆地的西部,初夏旱的频率可达80%以上,中心在梓桐、中江、简阳一线附近。在长江中下游地区,初夏是梅雨季节,此期降雨量较多。但有些年份,或因东南季风来得晚,梅雨推迟;或因西太平洋副热带高压强大,于6月西伸北跳,控制长江中下游地区,干旱少雨,出现"空梅",形成初夏旱。

伏旱是指发生在盛夏"三伏"期间的干旱,在我国北方和南方

都可能发生。7月上旬,西太平洋副热带高压的脊线由20°N跃进到25°N左右,其北的雨带移到华北、东北地区,长江中下游地区为副热带高压所控制,空气下沉,天气晴热少雨,蒸发力很强。如果沿高压脊线西侧北上的台风偏少,则这个地区会因雨量较常年偏少而发生伏旱。据统计,长江中下游地区1951～1980年的30年中有25年发生伏旱,频率高达83%。北方的伏旱是由于西太平洋副热带高压异常产生的。所谓副高异常主要有2种情况:一种是有些年份,副高异常强大,副高脊线异常偏北,甚至位于40°N附近(如1981年7月下旬的副高脊线位置),北方大部分地区受其控制而发生伏旱;另一种是有些年份,副热带高压位置偏南,其脊线位于20°N附近,雨带在江淮一带停滞,北方广大地区降水偏少而发生伏旱。一般来说,我国北方的伏旱范围比春旱和初夏旱小,发生的概率也较少,主要发生在38°N以南地区,从咸阳以东的渭河谷地到河南境内的黄河沿岸,伏旱最为频繁,豫西丘陵区和晋南地区伏旱发生的频率高达75%,关中东部为60%,陇东降为50%。这个地区的伏旱多发生在7月下旬到8月下旬之间,其中8月上旬发生的概率最高,占50%以上。

3.秋旱

9月份以后,西太平洋副热带高压迅速南退东撤,雨带南移。如果副高的撤退比常年快,使降水量显著偏少,就会发生秋旱。秋旱主要发生在湖南、湖北、江西、安徽等省。这些地区的秋旱常与伏旱相连,形成伏秋旱。例如江西省的赣抚平原、日于江上游、渌水上游和吉太平原,伏秋旱频率均在45%以上。华北地区也是秋旱较多的地区。

4.冬旱

我国冬季为干冷的极地大陆气团所控制,雨雪稀少,降水变率很大,冬旱频繁。但由于北方大部分地区农田冬季休闲,仅部分地区种植越冬作物,这些越冬作物又处于越冬期,耗水很少,冬旱直

接造成的旱灾并不多。但在华南和西南地区，冬季温暖，田里有农作物在生长，农作物受冬旱而成灾的可能性就比较大。

5.季节连旱

根据统计，我国各地区发生季节连旱的概率见表5-4。

表5-4　各地区季节连旱的概率

地区	连旱概率(%)						
	春夏	夏秋	秋冬	冬春	春夏秋	全年	合计
黄淮海	25	—	—	7	21	4	57
长江中下游	11	21	4	—	7	—	43
东北	21	7	—	7	—	—	35
西北	21	4	—	—	7	—	32
华南	4	25	4	29	—	—	62
西南	—	4	—	32	—	—	36

从表5-4可以看出，黄淮海地区春夏连旱和春夏秋连旱发生的概率较高，分别为4年一遇和5年一遇，受旱严重的地区干旱曾持续150天。东北和西北地区都以春夏连旱最为频繁，约5年一遇。东北地区1980年春夏连旱，最严重的地区干旱持续170多天。长江中下游地区以夏秋连旱为主，受旱严重的年份干旱持续150多天。西南地区冬春连旱的概率很高，平均3年一遇，受旱严重的地区干旱曾持续150天以上。华南地区冬春连旱的概率也很高，平均3年多就有1次，其次是夏秋连旱，平均4年一遇。

三、旱灾的防御措施

防旱抗旱的措施很多，主要有以下几种。

(一)建设稳产高产农田，纳雨蓄墒

农田基本建设的中心是平整土地，保土、保水。根据我国各地的经验，修建各种形式的梯田、沟坝地，进行小流域综合治理，是行

之有效的抗旱增产措施。

梯田是我国农民在长期生产实践中创造的,可以分为水平梯田、坡式梯田、隔坡梯田和反坡梯田等形式。坡地修成梯田后可以增加降水就地入渗,遏止地表径流,减轻土壤冲刷,集水蓄墒,为农作物和林木生长创造良好的土壤水分条件。

以小流域为单位,工程措施和生物措施相结合,缓坡修梯田,种耐旱作物,陡坡种草种树,坡下筑沟坝地,山、垣、坡、沟、谷、川利用各派用场,综合治理,充分发挥拦土蓄水、改善生态环境、兴利除害的作用。

(二)合理耕作,蓄水保墒

由于受季风气候的影响,我国农田土壤水分循环具有明显的年周期性和不稳定性。合理耕作,蓄水保墒,是抗旱增产的重要措施之一。耕作保墒的要点是要适时耕作,讲求耕作方法和质量,注意耕、耙、耱、压、锄等技术环节的配合。

(三)兴修水利,节水灌溉

兴修水利,发展灌溉,在农田土壤含水量下降到适宜含水量下限前及时进行灌溉,是抗旱增产的有力措施。但我国是一个水资源并不丰富的国家,农田灌溉应从传统的丰产灌溉转向节水高效灌溉。也就是根据作物的需水规律和适宜的土壤水分指标,在充分利用自然降水和土壤储水的基础上,进行必要的补充灌溉,以保证作物需水关键期供水和干旱期用水,使有限的水资源发挥最大的效益,提高水资源的整体效率。

(四)选用抗(耐)旱作物和品种,合理调整作物布局

随着植物抗旱性研究的深入开展,越来越多的事例证明,利用植物本身的抗旱能力,培育抗(耐)旱的植物新品种,是防御干旱的一个经济有效的途径。耐旱作物和抗旱品种对干旱条件的适应性有多种途径,或者借助于扩展的根系深入土壤深层,吸收较多的水分;或能进行有效的蒸腾调节,减少对水分的消耗;或具有较强的

生理耐旱性，能在干旱条件下保持正常的代谢活动。从抗旱避灾考虑，应该选用抗旱性强、生育期短和产量相对稳定性高的作物和品种。

我国作物种植比例的主要问题是夏粮与秋粮、粮食作物与经济作物、用地作物与养地作物的种植比例失调，应根据各地的具体情况进行合理调整，做到因地种植，合理布局，才能充分利用当地的自然资源，趋利避害，达到稳产增产的目的。

（五）地面覆盖栽培，抑制土壤蒸发

北方旱地农田土壤水分平衡观测结果表明，土壤蒸发量占同期降水量的百分比，冬麦田夏闲期为65%左右，春麦田休闲期（冬前）为80%左右，秋田冬闲期为72%～244%。在冬小麦生育期间，土壤蒸发量占农田蒸散量的百分比，苗期高达70%以上，全生育期约为44%～48%。棉花全生育期土壤蒸发量占蒸散量的57.7%。由此可见，抑制土壤无效蒸发是抗旱增产的途径之一。

田间定位试验和生产实践证明，用沙砾、秸秆、地膜等材料覆盖在农田表面，可以有效地抑制土壤蒸发，达到蓄水保墒的目的。在我国西北地区，用不同粒径的砾石和粗砂覆盖在土壤表面建成的沙田，渗水力极强，除暴雨外，降水能全部渗入土壤，而且沙、砾石颗粒比较粗，下层的土壤水分不能以毛管水的形式移动到土壤表面，蒸发失水也很少。用作物秸秆覆盖农田，可使土壤免受雨滴的直接冲击，保护表层土壤结构，抑制土壤蒸发，具有明显的培肥改土、蓄水保墒和增产增收效果。

（六）化学控制措施

经过大量研究和反复试验、推广，我国在土面保墒增温剂、保水剂、抗蒸腾剂和种子处理等方面取得了明显的抗旱增产效果，为抗旱防旱工作开辟了新途径。据试验，在土壤表面喷保墒增温剂，可有效地抑制土壤蒸发，在日蒸发量为1.5～8.9 mm的条件下，抑制率在33.3%～48.9%之间。喷洒后9天测定，对照地0～30

cm土层的水分减少32.9%，而用剂地仅减少17.9%。保水剂是具有较强吸水性能的高分子化合物，其吸收的水分量相当于本身重量的数十倍至数百倍，甚至上千倍。保水剂吸水后缓慢释放水分。它可反复吸水、释水。因而把保水剂施入土壤后，能增强土壤的保水能力，减轻干旱对作物的危害。叶面喷施黄腐酸(FA)、甲草胺、乳胶、硅酮、石蜡等高分子物质，可有效地抑制蒸腾，减少土壤水分损耗，减轻干旱对作物的危害。

第二节 涝 灾

一、洪涝与湿害的概念及其类型

涝灾是由于在某段时间内降水量过多和降水强度过大而造成的。按照降水量过多和降水强度过大的程度、危害的情况，涝灾可以分为洪涝灾害和渍涝灾害。

洪涝灾害系指大范围的暴雨或特大暴雨引起山洪暴发，江河水位猛涨，堤坝决口，洪水泛滥，淹没农田、房舍，冲毁道路、桥梁和农业设施，冲刷土壤，还可引起泥石流和山体滑坡，造成人、畜伤亡、财产严重损失的后果。

渍涝灾害简称"渍害"，又叫"湿害"或"沥涝"。它是由于连阴雨时间过长，雨水过多所致，或发生于洪涝过后，因低洼地积水难排，使土壤水分长期处于饱和状态，土壤中空气和水的比例失调，造成作物根系缺氧，烂根死苗，花果霉烂，籽粒发芽，导致农作物大幅度减产失收。

根据涝灾发生的季节，可把它们分为春涝、春夏涝、夏涝、夏秋涝和秋涝等几个类型。

(一)春涝

春季的涝灾以湿害为主，局部地区也有洪涝。春涝主要发生

在南岭及长江中下游地区。江淮地区春季常有连阴雨、低温寡照天气，易发生“三麦”大面积湿害和棉花烂种现象，使越冬作物如冬小麦、油菜因雨涝而烂根、早衰，降低千粒重和结实率；由于连阴雨天气，湿度过大，还会引发小麦白粉病、赤霉病、锈病、油菜霜霉病、菌核病、粘虫的发生和蔓延。在收获季节，会造成大、小麦和油菜发芽霉烂。湿害还影响大春作物播种、出苗和幼苗生长，引发棉花立枯病和炭疽病及水稻绵腐病的发生流行。在华南，雨水过多的春天也可能发生洪涝害。

东北的三江平原，在夏秋降水丰沛的年份，冬季土壤封冻前的土壤含水量比较高，加上冬季寒冷而漫长，冻土层深厚。开春后，气温迅速回升，地表解冻，但底层仍处在冻结状态，土壤水分下渗受阻。如果这时春雨又较常年偏多，雨水滞留地表，极易发生春涝，造成田间作业无法进行，春播工作受影响。

此外，黄河在春季也会发生洪涝，称为“凌讯”。这是由于黄河中游的宁夏和内蒙古间河段，以及下游的河南和山东河段，都是从低纬度地区流向高纬度地区，在春季，上游回暖早，河水部分融化，水和水块一起向下游流动，而此时下游河段仍是冰凌封河，上游流动下来的冰块遇到冰河阻挡，插冰形成冰坝，堵住河水，致使上游水位猛涨，凌洪漫溢，严重时也会造成堤防决口，淹没农田，引发洪涝灾害。

（二）夏涝

夏涝以洪涝为主。我国绝大部分农业区，季风气候特点十分显著，全年的降水量大部集中在高温湿润的夏季。黄河中下游地区，海河、辽河流域，夏季的大部分降水量又集中在 7～8 两个月，而且往往又集中在几次暴雨过程中，有的年份，甚至 1 天的大暴雨就超过了当地的年平均降水量。所以，我国夏季容易形成洪涝灾害。

夏涝在黄淮海平原、长江中下游、华南、西南和东北等地区发

生的概率较高。在北方地区,夏涝主要影响夏收、夏种,使小麦籽粒不饱满,影响收割与脱粒,严重时造成发芽,甚至霉烂;夏涝还使棉花蕾铃大量脱落,使玉米、高粱、谷子等大秋作物倒伏。在长江两岸,夏涝使水稻倒伏,降低结实率和千粒重。严重时水淹稻田,造成减产、失收。

(三)秋涝

入秋以后,降水量迅速减少。但局部地区的大雨、暴雨可引起小范围的秋涝。秋季连续阴雨时间持续过长,雨量过大,也会发生大面积的湿害。

秋涝在西南地区发生概率最高,其次是华南沿海及长江中下游地区,再次为江淮地区。秋涝对水稻、玉米、棉花等作物的产量和品质影响很大。秋涝会造成晚稻、花生等发芽霉烂,甘薯腐烂。棉花受涝则引起蕾铃大量脱落,铃重减轻,甚至烂铃僵瓣,降低纤维品质。玉米受涝则造成秃尖,籽粒不饱满,甚至提前死亡。

二、涝灾的成因

我国的涝灾与天气异常有密切关系,而地形和人类活动对涝灾的形成也有较大的影响。

(一)涝灾与天气

我国是一个季风气候明显的国家,在冷暖空气交绥的地区(锋区)常形成雨带。雨带的南北移动是由季风的强弱及其进退决定的。如果大气环流异常,造成雨带在某一地区停留时间过长,徘徊不前,导致降水量比常年显著偏多,是发生涝灾的主要原因。例如江淮地区,1954 年 7 月 500 hPa 高空图(图 5 - 2)上的环流形势与常年明显不同。中高纬度低压槽比较深,高压脊比较强;低纬度副热带高压位置偏南,相当于常年 6 月份的位置。同时,在俄罗斯滨海地区和我国东北经常出现阻塞高压,使环流稳定少变。在这种形势下,亚洲上空盛行径向环流,西伯利亚有很强的西北气流,引

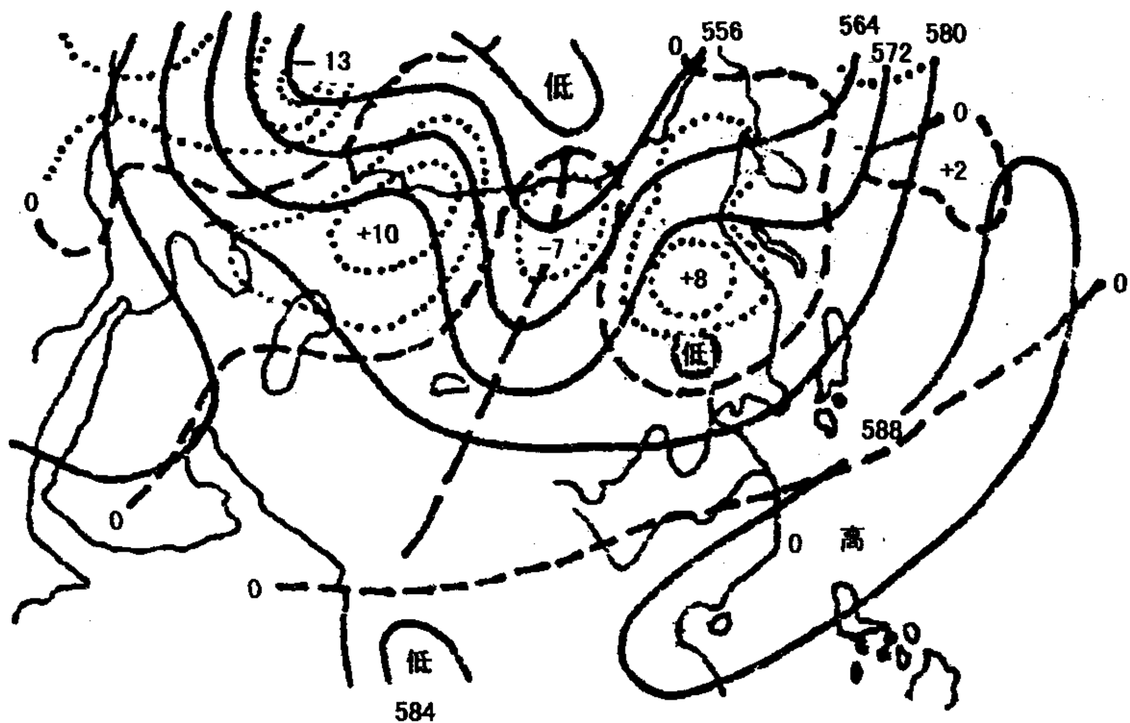


图 5－2　1954 年 7 月 500 hPa 天气图

导冷空气一次次向南侵入；副高位置偏南，暖湿空气与冷空气在江淮地区相遇，雨带长时间停留，结果造成严重涝灾。

台风侵袭时所带来的暴雨，也是发生涝灾的一种天气原因。例如，1975 年 8 月 5～7 日，登陆台风伸入到河南省驻马店、许昌、南阳 3 地区，并在那里停留，发生了一次历史上罕见的特大暴雨，暴雨中心 3 天降水量达 1 605 mm，在约 1 460 km^2 的区域内，暴雨过程总降水量超过 1 000 mm，致使 2 座大型水库和不少中小型水库同时垮坝，洪水迅速泛滥，大量农业设施被毁，酿成巨大灾难。此外，高空低涡与东移西风槽配合，也常常发生强烈降水而造成洪涝灾害。1963 年 8 月，我国西南地区产生的高空低涡北上，移到河南北部停滞不前，此时从西北地区移来一西风槽，使本来就含有充沛水汽和具有上升运动的形势得到加强，引起大量降水，造成豫北、河北、天津的大水灾。

湿害一般发生在连阴雨天气条件下，所以天气型也比较多。

以湿害比较严重的长江中下游地区为例，发生湿害的天气型有梅雨型、欧亚阻塞型、北方大低涡型和鞍形场型。初夏季节，地面天气图上高压中心在日本附近，四川为低压，江淮地区有1条准静止锋，700和850 hPa等压面天气图上多有近东西向的切变线与地面锋相配合，阴雨区大致位于700 hPa等压面上的切变线与地面锋线之间，这就是典型的梅雨天气型。这种形势维持的时间越长，西太平洋副热带高压和印缅低压槽向准静止锋输送的暖湿空气越强，则总降水量越大，湿害也越严重。在春季，北支西风绕道青藏高原北边，经中亚到西伯利亚，形成一个宽槽，槽后的宽脊向华北和长江中下游输送冷空气。在里海形成切断低压，其南的南支西风绕过青藏高原南边，在孟加拉湾形成低压槽，槽前西南气流一直影响到长江中下游，在700 hPa等压面上形成1条切变线，地面上为静止锋，出现的连阴雨天气，为阻塞型。低涡型是北支西风在我国新疆到内蒙古形成1个浅脊，南支在孟加拉湾形成低槽，南北2支急流在长江中下游汇合，地面天气图上在长江流域和南岭之间有一条准静止锋摆动，也会出现连阴雨天气。鞍形场是太平洋高压西进到东南沿海海面，西伯利亚到北疆有1个浅脊，孟加拉湾有1个低槽，鄂霍次克海是低压，东亚气压场呈鞍形。在地面天气图上相应地呈鞍形场，长江中下游为准静止锋，因而出现连阴雨天气。

(二)涝灾与地形

我国的涝灾与地形有密切的关系。在山脉的迎风坡，由于气流受地形的抬升作用，大雨、暴雨较多，强度较大，是涝灾的多发区。如秦岭南侧、南岭迎风坡、四川盆地西北坡的青衣江暴雨区、鹿头山暴雨区、大巴山巫山暴雨区等均位于山脉的迎风一侧。在山地与平原的交界处，也是涝灾多发区。例如，海河流域的西北面是高原和山地，东南面是广阔的平原，发源于西北山地的河流在山区坡陡时流速大，带沙量很大，进入平原后，坡度突降，流速骤然变

小,泥沙大量沉积,河床被抬高,一遇暴雨,山洪暴发,下游宣泄不及,常发生洪涝灾害。在大江、大河的汇合区,也容易发生洪涝灾害。例如重庆,它受岷、沱、涪、嘉、渠诸江流域的暴雨和洪水的影响很大,即使当地无暴雨也会发生洪灾。据北碚水文站统计,1957～1987 年 31 年间,本地暴雨所产生的洪水仅占 16%,而过路洪水则占 61%,既有当地暴雨又有过路洪水共同作用所形成的洪水占 23%。因此,重庆 1981 年 7 月遭受了 70 余年来的一次特大洪水。

山前低平的凹地,是沥涝易发区。例如北京市昌平县南部平原是个小凹地,其北是山地和山前洪积扇,雨季降水大量汇集平原,而南边又是相对较高的平地,水不易流出,所以雨季常发生沥涝。

在河网地区,湿害发生的概率较高。因为在这类地区,地下水位较高,土壤透水性差,在雨水较多时,地下水位很快就上升到接近地面,而且经常维持在 50 cm 左右,甚至更浅,形成过湿的土壤环境而发生湿害。

(三)涝灾与人类活动

人类祖祖辈辈饱受涝灾的侵害,世世代代探求根治水灾的良策。然而从历史上看,洪涝灾害有越来越频繁的趋势,究其原因,与人类自身的活动有密切关系。据测算,6 667 hm^2 森林所含蓄的水量相当于一座库容为 200 万 m^3 的水库。然而近 40 年来,由于种种原因,我国先后几次形成砍伐森林的高峰。森林面积锐减,降低了滞洪力,使洪峰来势凶猛,峰高流急,增大了防洪抗洪的难度。毁林开荒又加重了水土流失,使河床抬升,水库淤积,降低了调洪防洪能力。

湖泊对削减洪峰起着重要作用,但由于近几十年来水土流失严重,泥沙淤积于湖泊,从而兴起大规模的围湖造田,使湖泊面积大量减少,降低了湖泊的调洪能力,加重了洪涝灾害。

不顾客观规律,盲目发展,也会加重洪涝灾害。在大跃进年

代,由于不顾地质条件,不讲施工质量,忽视维修管理,造成许多垮坝溃堤事件,加重了洪涝灾害;随着我国人口压力增大,一些单位向河滩地发展,挤占行洪水道,与河争地,也会加重洪涝危害。

三、涝灾的时空分布特征

我国涝灾发生的地区很广,不同地区涝灾发生的季节也不相同。现根据一些学者的研究结果,简要介绍如下。

(一)涝灾的地区分布

我国幅员辽阔,地形复杂,季风显著,涝灾分布具有明显的区域性。其主要特点是:东部多,西部少;沿海多,内陆少;平原多,高原山地少。徐瑞珍等把全国分为5个纬度带,分别统计各纬度带各时段严重涝灾发生的频次,结果表明,我国涝灾在25°~30°N发生频次最高,且具有明显的阶段性。1470~1569年的这100年里出现涝灾较少,1570~1669年间较多,1670~1769年间又较少,1770~1869年间又较多,1870~1977年间更多(表5-5)。

表5-5 各纬度带各时段重涝发生频次

纬度带＼时段	1470~1569	1570~1669	1670~1769	1770~1869	1870~1977
5(40°N以北)	—	—	—	—	9
4(35~40°N)	5	9	5	9	7
3(30~35°N)	4	8	6	5	9
2(25~30°N)	9	9	2	10	16
1(25°N以南)	—	—	—	—	8
2~4带之和	18	26	13	24	32

冯佩芝等根据1951~1980年全国358个气象站发生涝灾的次数及地区分布特征,把全国分为多涝区、次多涝区、少涝区和最

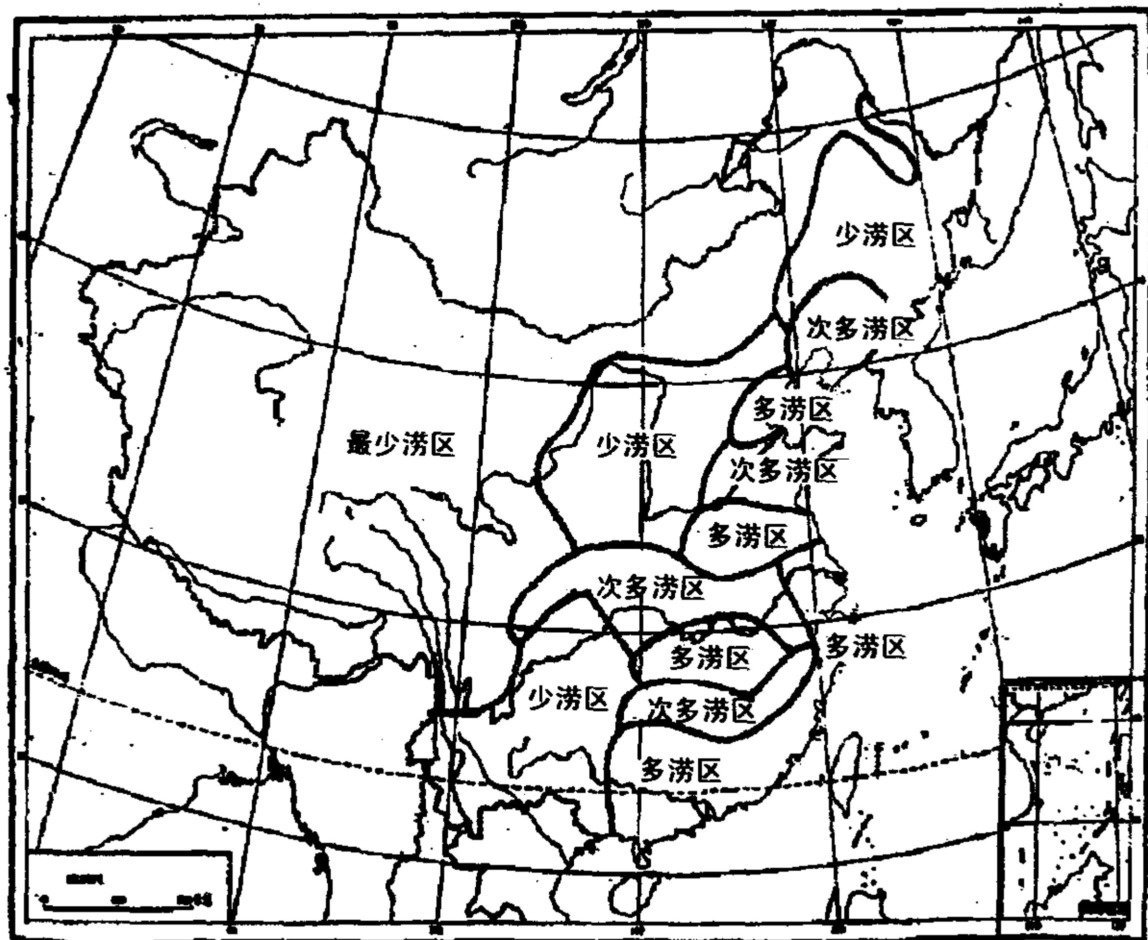


图 5－3 中国涝灾地区分布示意图

少涝区(图 5－3)4 种类型。

(1)多涝区 该区包括华南地区(广东沿海和广西北部为 2 个多涝中心);湘北、赣北地区;东南沿海地区(包括苏、浙沿海和福建中、北部一带);淮河流域和海河流域(主要是天津、冀东和冀中地区),平均 2～3 年受涝 1 次。

(2)次多涝区 该区包括江南南部和武夷山地区(包括湖南、江西两省的南部,福建的西部和北部);汉水流域、长江中下游至淮河南岸之间及四川盆地部分地区(包括安徽中部、湖北及四川盆地东部、北部、西部和陕西南部等地);黄河下游地区(主要是山东、河北南部、河南北部等地)和辽河地区。平均 3～5 年受涝 1 次。

(3)少涝区　包括云贵高原地区(含云南、贵州两省的大部及四川盆地中部、南部和广西西部等地,其中贵州东部和广西西部是这一地区受涝次数相对较多的地区);黄河中游地区(包括陕西大部、甘肃东部、宁夏、山西、河北北部及内蒙古河套地区)和东北平原地区(主要是黑龙江省的平原地区和吉林省,其中黑龙江的中部和东南部是该区受涝较多的地区)。平均15年受涝1～2次。

(4)最少涝区　包括西北大部、青藏高原及内蒙古大部和东北的大、小兴安岭地区,30年中没有发生过1次较大范围的涝灾,即便发生涝灾,也是局地性的,而且次数少,是我国涝灾发生最少的地区。

(二)涝灾的时间分布

我国发生涝灾的时间,一般是南方较早,北方较迟。华南3～4月份常发生湿害,洪涝灾害从4月份开始发生,5～6月份则比较多;长江中下游4～5月多湿害,6～7月发生洪涝灾害较多;黄淮海平原和东北地区的涝灾多发生在7～8月份。三江平原4～5月份常发生湿害。沿海各省因受台风影响,涝灾发生期较长,从浙南到广西沿海为5～9月(海南岛为8～10月),江苏沿海为6～9月。云南、贵州、桂西、四川夏季有洪涝灾害,秋季还有湿害。北京气象中心根据1951～1980年各地区各季发生涝灾的次数占年总次数的百分率,分析了各地区涝灾发生的时间特征,其结果如下:

(1)华南地区　该地区涝灾从4月份开始,到11月份结束,是涝期最长的地区。但涝灾集中期在5～7月,这3个月的涝灾占全年的70%～95%。从季节上看,夏涝最多,春涝和春夏涝次之,秋涝和夏秋涝最少。

(2)长江中下游地区　这个地区4月份开始出现涝灾,5月受涝次数显著增多,6月是梅雨的主要时期,是全年受涝次数最多的1个月,大部分地区受涝次数占全年的25%～35%。7月受涝概率稍减,一般为20%～25%。7月下旬到8月下旬进入伏旱少雨

季节，但沿海地区受台风袭击仍可遭受涝灾危害。大部分地区涝灾集中在5～7月，受涝次数占全年的70%～90%。从季节上看，夏涝最多，春涝次之，春夏涝居第三位，夏秋涝最少。

(3)黄淮海地区　本区进入6月以后，华北平原可出现涝灾。7和8月涝灾范围扩大，次数增多，为全年涝灾最多的时期。这2个月，淮河流域、河南北部、河北南部、陕西中部和南部等地，受涝次数占全年的60%～80%；山东、河北大部、京津地区占80%以上；内蒙古几乎占100%。从季节上看，夏涝最多，秋涝和夏秋涝最少。

(4)东北地区　该地区受夏季风影响最晚，雨季较短，涝灾几乎都集中在夏季，特别是7和8月这两个月。三江平原因地势低洼，若上年秋冬雨雪多，春季回暖后，积雪融化，土壤返浆，也易出现渍涝，春季雨雪多的年份，更会加重涝害。

(5)西南地区　本区由于地形复杂，各地雨季开始早晚不一，雨量最集中期也不尽相同，所以涝灾出现的早晚和集中时期也不完全一样。例如，贵州地区涝灾出现在4～8月，涝期不十分集中。四川除东部外，大部分无春涝出现，涝灾主要集中在夏季3个月，9～10月份还有秋涝发生。云南涝灾主要集中于夏季，但春、秋季局部地区也有山洪暴发。

(6)西北地区　该区终年雨雪稀少，几乎没有出现过大范围的涝灾。夏季如降大雨或暴雨，局部地区也可出现山洪，但次数少，且比较分散。

四、涝灾的防御措施

我国受季风气候的影响，各地往往是先旱后涝，涝后又旱，旱、涝灾害交替出现。因此，我国治水应采取蓄水与泄洪相结合的方针，既修水库蓄水，又疏通河道泄洪，把降水进行合理的再分配，做到既能防洪，又能抗旱，以减少旱、涝灾害的损失。现将防涝的主

要措施分述如下。

(一)整治河道,修筑堤防,修建水库,开展水土保持

在我国历史上,严重的洪涝灾害多数是河道淤塞,堤岸失修,遇大暴雨时发生决堤引起的。因此,应根据各江河流域的自然地理条件、社会经济状况和国民经济发展的需要,进行综合治理,合理安排蓄、泄、滞、分的工程措施,以提高河道宣泄能力和适当控制上游洪水来量。提高河道渲泻能力的措施有整治河道(包括截弯取直、河槽拓宽、河道清障、清淤等),整修堤防,利用湖泊或低洼地蓄洪,向相邻流域分洪和增辟入海洪道等,以确保沿江、沿河两岸耕地、城镇、工业、交通和人民生命财产的安全。如海河流域,在中下游开挖、疏通了潮白河、永定新河、独流河、子牙河、漳卫新河等20多条大型骨干河道,入海流量可达2万 m^3/s,为治理前的10倍,使洪水排泄通畅,洪涝灾害大为减轻。

修建水库蓄洪和开展水土保持,以控制上游洪水来量。修建水库拦蓄洪水,除可以减轻水库下游的洪涝灾害外,还有农田灌溉、工业和城市生活供水以及水力发电等效益。根据大江大河干支流的地理位置,统一规划设计干支流水库群的联合运用,防洪效果更加显著。例如,永定河在1950年以前的400多年中,仅芦沟桥一带就决口14次,洪水两度淹了北京城。1954年建成官厅水库,当年就拦住了4 000 m^3/s 的洪峰。1959年又出现2 700 m^3/s 的洪水,经官厅水库拦蓄后,水库仅放出下泄流量760 m^3/s,保护了下游4万 hm^2 耕地的安全。整个海河流域现已建成25座大型水库和1 360多座中小型水库,总库容超过200亿 m^3,为多年平均径流量的92%,控制山区面积的80%,不仅大大减轻了洪涝灾害,而且在农田灌溉、工业供水和城市生活用水方面发挥了巨大的作用。

水土保持对整治国土、治理河流、减少干旱和风沙灾害,合理利用山区、丘陵区和风沙区的水土资源具有重要意义。水土保持

的生物措施可以增加植被覆盖率，从而减轻雨滴对地面的打击，增加降水就地入渗率，减少地表径流，减缓流速和削弱冲刷力。据湖北省黄岗地区水土保持试验站1965～1973年的实测资料分析，一次降水量小于100 mm时，森林可比荒地削弱17.4%的地表径流；当降水量为150 mm时，森林可比荒地削弱3.8%的地表径流；当降水量为200 mm时，森林可削弱1.2%的地表径流。由此可见，森林对削减大雨和暴雨时的地表径流的作用是显著的。另据测定，森林涵养水分的能力为裸地的7倍。因此，农谚说："山上栽满树，胜似修水库。"

(二)修建田间排水沟

在易涝地区，雨季前修好田间排水沟是非常重要的防涝措施。田间排水沟一般是在整地时修筑。它由畦或垄沟、与垄沟行向垂直的毛排沟及与垄沟行向平行的排水沟组成，沟沟相通，一级比一级深，形成一个完整的排水体系，雨水过多时能顺利排出田间积水，以防止涝害发生。在长江流域湿害常发区，高标准地修好明沟和暗沟，明沟速排地上水，暗沟降低地下水位，可有效地防治三麦湿害。据测定，在0～100 cm土层中，土壤含水率在10～20 cm最高，30～40 cm处较小，60～70 cm处又升高，80～100 cm处又降低。因此，为了排出土壤表层的水分，明沟的深度不应小于30 cm；为了排除深层水分，暗沟的深度不应小于70 cm。明沟开成外深里浅的斜坡式，可增加地面径流，减少雨水下渗，有利于降低地下水位。明、暗沟结合是在2条暗沟之间加开若干条明沟，以提高排水能力。沟距大小对排水速度影响很大，在降水过程中，沟距小的排水快，地面积水少，雨后地下水位升高少。沟距越大，排水效果越差。实践经验证明，一般沟距以3 m为宜。

暗管排水也是防治湿害的有效措施。如昆山县用瓦管埋设在1.2 m深处，间距一般在15 m左右，也有加密到7.5 m的，排水效果更好。此外，常熟县推广的鼠洞(鼠道)排水，效果也很好。它是

用手扶拖拉机牵引打洞机沿田块方向，在离地表 60～100 cm 深处开成横断面呈椭圆形、面积为 40～50 cm^2 的鼠洞。洞距为 5～6 m。无论是暗管还是鼠洞，都要修成一定坡度，以利排水。防止修成洞外高，洞里低，或高高低低，均不利排水。

(三)改良土壤结构

遇大雨后地面积水排除的快慢，还与土壤的通透性有关。在土壤粘重，犁底层坚实的地块里，旱作物受涝害的程度就比较重。因此，实行深耕，加深耕作层，打破坚实的犁底层，改良土壤结构，增强土壤通透性，减弱土壤保水力，从而降低土壤湿度，是减轻湿害的有效措施。

增施有机肥能疏松土壤，改善土壤性质，也能减轻湿害。据中国科学院南京土壤研究所在东亭基点测定，每公顷水稻田稻草还田 2 250 kg，可增加中粗孔隙 1.1%～1.2%，土壤容重减轻 9%，能增加土壤透气性，改善耕性，防止板结，有很好的减轻湿害的作用。淮南地区在水面放养水花生、水葫芦、水浮莲，除作饲料外，还可沤肥，改土效果显著，湿害明显减轻。在四边地和稻田套种田菁，它的根系和茎秆压青，也有良好的改善土壤物理性状的作用。

(四)调整农业结构，实行防涝栽培

在涝灾多发区，因地制宜地调整种植业与养殖业、旱地作物与水生作物的比例，能减轻涝灾的危害。北京市通县永乐店乡是平原上的洼地，涝灾严重，产量低而不稳。后来把一部分洼地挖成养鱼池，挖出的土用于培高与其相邻的农田，池里养鱼，田上种庄稼，既减轻了涝灾，又增加了经济收入。在一些江河下游的低洼地，排水困难的，种植菱藕，可减轻涝灾，提高经济效益。

实行防涝栽培，也是防御涝灾的重要措施。玉米、棉花、花生、大豆等旱地作物采用起垄栽培有很好的抗涝作用。我国东北地区一般是先起垄，在垄背上播种。在华北地区，一般是先平播，植株长大后再逐渐培土，雨季前形成垄台和垄沟。雨水多时，垄沟将积

水排出，垄背既不淹水，又能撤墒，为根系创造一个比较适宜的土壤环境。所以在涝灾较多的地区，垄作玉米比平作可增产10%～20%。在我国南方，在水田作垄作厢，实行半旱式耕作法，栽种稻麦，能有效地减轻洪涝危害，增产效果显著。

第三节　低温冷害

一、低温冷害的机理和类型

(一)冷害对农业的危害

低温冷害是世界范围的自然灾害，仅报道水稻发生冷害的就有20多个国家。日本是受冷害威胁最大的国家，1600～1800年间重灾达86年，大致3～4年1次，并具有集中发生的特点。1985年苏格兰夏季低温，冬小麦播种后1年之久仍未成熟。

冷害在各地都有发生，与中国的气候特点和种植制度有关。由于大陆性季风气候年际变化大的特点，有的年份冷空气活动更加强盛和频繁。中国由于人均耕地少，复种指数是世界上最高的，也加剧了冷害的发生。

1996年2月中下旬华南出现历史上罕见的持续降温，热带、亚热带经济作物和蔬菜、果树损失达40亿元之巨。1975年云南的橡胶和其他经济作物也受到过严重的寒害。

长江流域及江南大部早春经常出现低温连阴雨导致早稻烂秧。油菜、麦类和棉花也常因春冷生长不良。长江中下游的6月低温可使早稻幼穗分化受抑制而发生空壳。秋季低温在南方通常称为“寒露风”，对水稻生产的危害更大，1976年长江中下游受寒露风危害，晚稻空壳“翘穗头”，减少40亿kg左右。1980年再次发生，仅江苏、浙江两省就减产20亿kg。杂交水稻对热量条件要求更高，在同样的种植制度下更易遭受冷害。

冷害是东北最严重的自然灾害,新中国成立以来,1954,1957,1969,1972,1976年这5年的平均减产幅度达15.2%,其中黑龙江省更高达20.3%。纬度和海拔越高,冷害越严重。黑龙江省统计积温每减少100℃·日,粮食减产7%～10%。主要喜温粮食作物中,对低温敏感程度的顺序大致是:水稻>高粱>玉米>谷子>大豆。由于玉米的播种面积最大,其受冷害程度往往左右着东北粮食总产的丰歉。低温年成熟度差的玉米水分含量大,品质很差且难于储存。

华北的冷害也相当严重,特别是70年代以来由于复种指数的提高,夏播作物的冷害更加频繁。冬前积温偏少使小麦生长量不足,对次年的产量影响很大。秋季低温导致大白菜包心不良而减产也是常见的一种冷害,如1980年10月中下旬的低温使大白菜实收比估产偏低1成以上。早春温度偏高,后春反复出现低温,可诱导一些叶菜提前抽薹,产量降低,品质下降,称为“先期抽薹”,是蔬菜生产上的重要灾害。

80年代以后中国北方气候变暖,但夏季升温不显著,西南地区夏季温度还有下降的趋势。虽然从总体上看全国各类低温灾害有减轻的趋势,但随着耐寒性差和生育期长的作物品种的大面积推广,以及热带、亚热带作物的大幅度北移,冷害仍经常发生,局部地区十分严重。

(二)植物对低温的反应

低温对植物的危害分为零下低温和零上低温2种情况,前者称为冻害(freenzing injury),与植物体内水分结冰相变相联系;后者称为冷害(chilling injury),一般不发生水分的相变。植物在出现低温时不一定都受到危害,有的植物在某些阶段还需要一定的低温刺激,只有在低温达到一定强度和积累足够的时间后,才能形成冷害或冻害。

作物对低温的反应包括抑制、滞后、累积、前历、补偿、伤害等

多种情况。

(1)抑制效应　作物对低温的初始反应是生长发育受到抑制，如叶面积和株高增长缓慢，干物质积累少，在程度较轻和时间较短时一般表现为可逆，即回升到适宜温度可恢复正常生长发育；反之经常表现为不可逆。

(2)滞后效应　冷害发生，往往在生理活动受抑制累积到一定程度才在外部形态上表现出来。因此，有的地方农民把冷害称为“哑巴灾”。

(3)累积效应　达到临界温度以下次数越多和低温持续时间越长，受害越显著。

(4)前历效应　指作物抗冷性由于低温前环境条件的改变而使作物的素质发生的变化。如冷害发生前植株经受过一定程度临界低温以上的低温锻炼，则在冷害发生时的受害较轻。如前期持续高温，气温骤然猛降，发生冷害的后果就更加严重。

(5)补偿效应(后历效应)　冷害发生后如气温回升或采取适宜水肥措施，低温造成的不利影响有可能得到补偿，甚至被抵消。

(6)对生长中心的伤害作用　植物的生长点如茎尖、幼穗、嫩芽、花苞等对外界环境变化最为敏感，通常受低温的危害最严重。

(三)低温对植物生理活动的影响

(1)光合作用　低温使植物体内叶绿素合成受阻，含量下降，有些植物的叶绿体还会受到破坏，低温还使光化反应速度减慢，导致光合作用速率降低(图 5－4)。低温导致的水分胁迫、气孔阻力增大、物质运输受阻等也间接影响光合作用的进行。据测定，水稻在 14.4℃下的光合速率仅为 24.3℃下的 72%，但经过低温和干旱锻炼后的秧苗其光合速率下降较少。光照充足和空气中 CO_2 浓度较高时，光合作用受低温影响的下降幅度也较小。

(2)呼吸作用　喜温作物在根温下降时呼吸作用下降很快，不利于根系的生长。在可见到的冷害症状出现之前呼吸有增强的趋

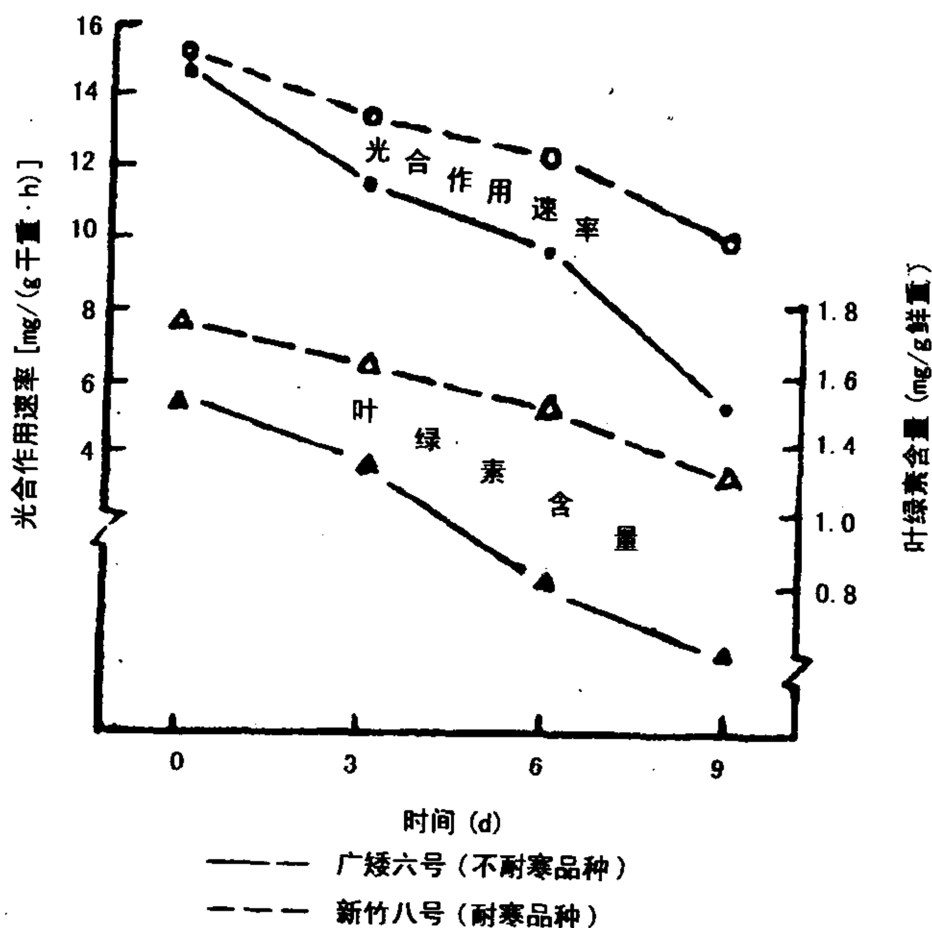


图 5－4 冷害对水稻秧苗叶绿素含量和光合作用速率的影响(陈权龙等 1962)

势，随冷害的发展线粒体受损伤，呼吸显著下降，直至出现不可逆的受害。

(3)养分吸收 低温抑制水稻对氮素的吸收。在 5℃ 低温下对硝态氮几乎不吸收，以吸收氨态氮为主。地温降低到 3～6℃ 时对氮素吸收的影响最大，对钾的吸收影响较小，但 12～16℃ 时以磷的吸收受影响最大。

(4)物质运转 温度降低时筛管液体的黏度加大，使物质运输受阻。^{14}C 同位素示踪试验表明，低温使茎叶有机物转化能力下降，向根系和穗部运输量减少。低温对磷在植株体内的运转影响

很大,在17℃下运转就已减弱,在10℃下基本停止。

(5)生物膜结构 早在1912年俄国马克西莫夫就指出原生质膜的伤害可引起细胞死亡。1973年Lyons提出零上低温对植物组织的损害首先是膜的相变,然后是膜的损害。由于低温使膜的类脂物质发生凝固,膜脂由液晶态变成凝胶态,膜的外形和厚度发生变化,出现孔道和龟裂,导致膜结合酶的活力降低,透性被破坏和原生质流动停止,细胞内离子失去平衡,代谢紊乱和有毒物质积累,最终造成植物体死亡。如果膜未被严重损伤,回暖后仍可修复使代谢恢复正常。这是迄今对低温冷害机理解释比较科学合理的一种假说。

(四)低温冷害的类型

冷害类型可按发生时期划分,如水稻有苗期冷害、孕穗到开花期冷害、灌浆期冷害等。有按天气类型划分的,潘铁夫将吉林省冷害分为低温多雨型、低温干旱型和低温寡照型。按照发生机理可划分为:

(1)延迟型冷害 作物生育期间遇较长时期低温,使生育期显著延迟,不能在初霜冻或下茬作物播种前正常成熟,导致减产或品质下降。华北小麦冬前积温偏少,导致分蘖少,苗情弱,影响次年产量;秋季低温使大白菜包心不足而减产,实际上也是一种延迟冷害。

(2)障碍型冷害 喜温作物孕穗到开花期低温引起幼穗发育受阻或授粉不良,结实率下降而导致减产。主要发生于水稻,有2个敏感期:花粉母细胞减数分裂期和抽穗扬花期。所造成的不育即使气温回升后也不可恢复。

(3)混合型冷害 既有障碍型冷害,又有延迟型冷害的发生,比上述类型单独发生的后果更加严重。

(4)苗期不良型 有些喜温作物苗期受低温影响,生长发育受到抑制,其后果不能简单地用生育延迟来解释。如玉米苗期低温,

叶片数和叶面积下降，株高降低，成熟并不延迟，但减产严重。大豆苗期冷害造成植株节数和结荚数减少，产量下降，但并不影响成熟。

(5)寒害　热带、亚热带作物在较高的零上低温作用下发生的生理障碍，我国华南地区习惯上称为“寒害”，实际上是一种障碍型冷害，但其症状类似霜冻，植株发生枯萎、腐烂或感病，直到死亡。其原因是热带、亚热带作物体内饱和脂肪酸较多，易在较高的低温下发生相变凝固，致使植株枯萎、腐烂或感病，直到死亡。

二、低温冷害的时空分布

(一)低温冷害的指标

冷害指标。辽宁省农业科学院认为，在5～9月的作物生长季节中，只要低温持续2～3个月，就可能发生冷害。孙玉亭分析东北地区粮豆产量与5～9月平均气温总和的关系，成显著的正相关，并以其距平值为东北冷害的指标(表5－6)。

表5－6　以5～9月平均气温总和的距平值(℃)为东北冷害的指标　(孙玉亭)

冷害强度$\sum t$ 5～9	80.0	85.0	90.0	95.0	100.0	105.0
一般冷害	－1.1	－1.4	－1.7	－2.0	－2.2	－2.3
严重冷害	－1.7	－2.4	－3.1	－3.7	－4.1	－4.4

寒露风的指标。粳稻花粉母细胞减数分裂期在日平均气温低于20℃和最低气温低于15℃时受害。抽穗开花期日平均气温连续3天低于20℃可造成危害，天数越长受害越重。籼稻的受害温度指标比粳稻要高出2℃。

热带作物寒害指标。主要热带作物寒害的最低气温指标见表5－7。

表 5-7　主要热带作物寒害的最低气温指标(℃)

作物	橡胶	椰子	腰果	胡椒	咖啡	油棕	可可	剑麻
轻微寒害	10	8	15	10	2	10	10	10
严重寒害	0	2	4	3	-1	2	5	0

(二)低温冷害形成的天气与气候背景

1.厄尔尼诺现象

1949～1982 年期间厄尔尼诺现象与黑龙江省冷害关系的研究表明,秘鲁沿岸春季海温与黑龙江夏季平均气温成正相关,即厄尔尼诺年对应冷害年,反厄尔尼诺年则一般为暖年。但 1982 年以后的厄尔尼诺现象与东北冷害的相关不明显。

2.太阳黑子

日本 250 年资料分析表明,太阳黑子极小年在北部大多要发生冷害。我国东北 1881～1979 年间出现的 19 个夏季低温年中,15 个出现在太阳黑子极大值、极小值或相邻年。

3.火山喷发

由于火山灰长时期停留在平流层而削弱了到达地面的太阳辐射。火山喷发后第二年我国夏季降温主要发生在东北西部、华北北部、长江中游和新疆大部。

4.天气系统

倒春寒对南方水稻育秧可造成很大危害,严重的烂秧死苗。秋季当经向环流加强,东亚大槽加深时,容易发生冷空气的爆发南下,导致晚稻孕穗到开花期冷害。

(三)冷害的时间分布

1.气候变化与波动

竺可桢指出中国 5 000 年来的气候存在冷期和暖期交替现象,在寒冷期冻害等低温灾害频繁发生。张家诚分析了近 500 年

的气候波动，认为存在4个冷期：1470～1520年、1620～1720年、1840～1890年及1945年以后。其间有3次回暖期。从20世纪50年代至70年代，中国大部分地区气温显著下降，低温冷害多次严重发生。进入80年代以来，除西南地区外，大部地区的气候变暖，尤其是东北的增温十分显著，冬季增温幅度大于夏季。在冷期内冷害频繁而严重，但在暖期内冷害发生次数少，且无严重冷害。东北和华北自1979年以后，仅在1985年发生过轻度的冷害。

2.不同地区冷害发生的主要季节

华南早稻播种和育秧的2～3月经常发生北方冷空气南下与南方暖湿气流相持造成的低温连阴雨，容易造成烂秧。江南的低温连阴雨和早稻烂秧则主要发生在3～4月。北方春季多晴暖天气，烂秧现象不严重。东北少数年份出现低温影响春播和作物苗期生长的情况。夏季低温以东北为最严重，华北有些年份也因夏季温度偏低使作物发育延迟，不能在种麦适期前成熟，形成冷害。南方除山区外一般不存在夏季低温问题。秋季水稻孕穗到开花期间，经常发生因冷空气活动造成的空壳瘪粒，在南方人们称为“寒露风”。实际这种冷害各地发生的时期不同，在华南主要在“寒露”节发生，长江流域主要发生在“秋分”，华北主要发生在“处暑”，东北还可能发生在“处暑”前。

(四)冷害的空间分布

1.东北冷害

从1951～1980年30年的统计分析看，冷害出现的频率北部高于南部，山区高于平原，以嫩江和牡丹江最多，为30%；通化、丹东次之，为26.7%；营口最少，为13.3%。严重冷害发生频率，嫩江为26.7%，牡丹江和佳木斯为20.0%，白城、锦州为6.7%(图5-5)。

2.寒露风

统计1951～1980年南方晚稻抽穗扬花期冷害发生日数，总的

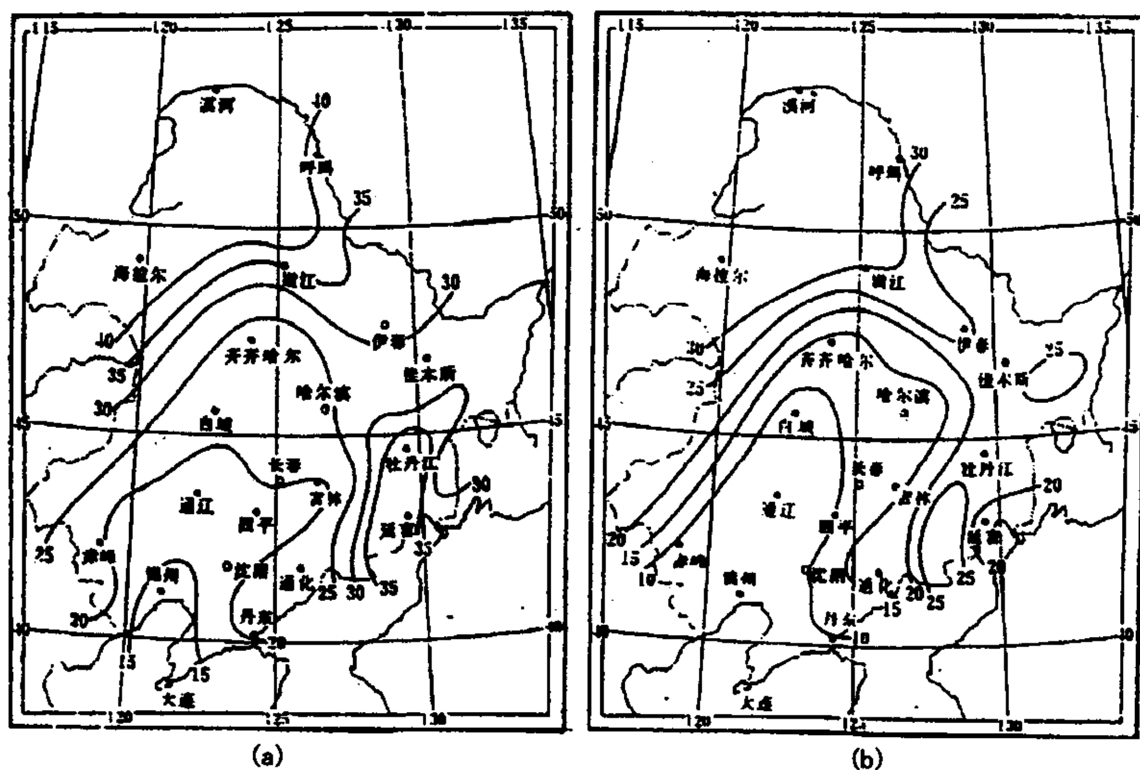


图 5－5　东北冷害(a)和严重冷害(b)的发生频率(据王书裕　1991)

趋势是由北向南减少。长江中下游粳稻在 9 月 1 日到 10 月 10 日期间,武汉到南京一线以北地区经历的寒露风天数达 10 天以上,浙江东南部、福建、江西大部和湖南东南部 5 天,以江西南部最少。长江中下游籼稻和杂交稻在 8 月 26 日到 10 月 5 日期间,安徽北中部、湖北北部、江苏南部和浙江北部经历的寒露风达 15 天以上,浙江南部、江西中北部和湖南南部为 5～10 天,福建和江西南部不到 5 天。华南籼稻和杂交稻在 9 月 21 日到 10 月 31 日期间经历的寒露风天数,广西北部超过 20 天,广东阳江和雷州半岛以及海南岛均不超过 5 天。在强冷空气南下时,华南南北各地寒露风可在大致相同的时间内发生。在秋季冷空气不强的年份,南北发生寒露风的日期可以相差很多。

3. 华北冷害

华北的冷害与东北冷害经常同时发生,此外还与复种有关。

春播一熟地区几乎不存在冷害问题。纬度偏北，复种指数又高的地区如北京郊区，夏播作物的冷害十分突出。在气候变暖的80～90年代，也仍然经常出现夏播玉米到10月上旬小麦播种后期仍不能正常成熟而被迫砍青的情况。

三、主要作物低温冷害的减灾对策

(一)减轻水稻冷害的措施

(1)按照气候规律调节品种和播栽期　一般以日平均气温稳定通过10℃和12℃的80%保证率日期分别作为粳稻和籼稻的安全播种期，薄膜育秧条件下南方可提早10天，东北提早20天，自南向北延迟。一般以秋季日平均气温不出现连续3天以上低于20℃和22℃的天气分别作为粳稻和籼稻安全齐穗期的指标，自南向北提早。齐穗到成熟粳稻需40天，籼稻需30天，将安全齐穗期后延30～40天即安全成熟期。

(2)选用耐冷丰产品种　干胚膜脂肪酸的不饱和程度与抗冷性密切相关，对不同品种的干胚膜脂肪酸组分进行分析，可作为品种抗冷性快速鉴定的一种方法。

(3)适时播种，培育壮秧　北方春播采取薄膜旱育秧稀播培育壮秧，能提高抗冷能力和提早抽穗；南方晚稻适当早播，可争取早齐穗，躲避秋季低温。

(4)施肥调节　抽穗前10～18天施“壮尾肥”可提早抽穗1～3天，有利于躲避冷害，降低空瘪率。但施肥过迟会延迟齐穗，低温年份迟追肥的后果更为严重。基肥增施有机肥和磷肥，可促进秧苗早发，也有利于提早抽穗。

(5)以水调温　出苗后秧苗抗冷力随叶龄降低，到三叶期最低，因此水层应随叶龄增加而加深。生长旺盛的秧田灌浅水或隔日换水，有利提高地温提早齐穗。据上海市气象局观测，在气温低于17℃时，夜间灌河水能提高田间气温，对防御减数分裂期和抽

穗期的冷害有一定效果。如冷空气较强可灌深水，但叶尖必须露出水面。待回暖后再逐渐排水。

(6)应急措施　开花期发生冷害时喷施赤霉素、增产灵、2,4-D、尿素、$KH_2(PO_4)$、KCl 等都有减少空秕的一定效果。上海市农业科学院用叶面抑制蒸发剂喷洒，可在1～2天内提高叶温1～3℃，并在3～5天内仍具有一定增温效果。

(二)玉米冷害的防御措施

(1)根据地区热量条件合理布局品种　高寒地区或复种下茬热量紧张地区应选用早熟品种，应具有在霜前或下茬播种前正常成熟的80%保证率。20世纪80年代以来由于气候变暖和消耗农时缩短，各地普遍采用了熟期更长的玉米品种，但需要注意生育期的延长不能超过气候变暖或农耗减少的程度，否则会人为造成新的冷害。

(2)适时早播　高寒地区在日平均气温通过8℃时就要开始播种。夏玉米要努力缩短农耗，早播1天可提早3天成熟。

(3)选用耐冷早熟高产品种　法国和加拿大都是因为选育出早熟耐冷品种才使玉米种植地带大大北移，面积和单产都增长数倍。

(4)促苗早发　增施有机肥和苗期松土，可提高土温促苗早发；磷钾肥能提高玉米苗的抗性，低温下用微量元素浸种可提早出苗。

(5)育苗移栽　可延长有效生长期，确保早熟增产，但费工且成本高，目前尚无理想的移栽机，只是在劳动力充足的地区才有可能推广。

(6)地膜覆盖　一般白天可提高5 cm深处地温3～5℃，播期可提前15～20天。可采用生育期更长、增产潜力更大的品种，每$667m^2$(1亩)一般能增产100～150 kg。但需相应增施化肥防止后期脱肥。又因发育提前后期易遇卡脖旱，而薄膜保墒效果到后期

会减弱，需要及时补水。

(7)掌握适宜的收获期　只要不发生霜冻，玉米在较低的零上气温下仍能灌浆，一旦发生霜冻则灌浆锐减乃至停止。小麦—玉米两熟制单就总产而言，是否需提前砍收玉米，要计算玉米早收的产量损失和小麦早种的增产效益，综合权衡其利弊。因为未充分成熟的玉米机收或脱粒易损，品质也差，还是以合理搭配品种，使上下两茬都能正常成熟，又能较充分地利用光热资源为好。

(三)大豆冷害的防御措施

(1)根据当地气候选用适宜的主栽品种　主栽品种应具有70%～80%的成熟保证率，严格控制越区引种。在大面积生产上应搭配20%～30%的早熟和偏晚熟品种，根据不同播期分别选用。

(2)适时播种　选好底墒，适时早播，力争早出苗。

(3)加强田间管理　及时中耕除草，增施有机肥和磷钾肥，喷洒生长调节剂，增强抗逆性。培育壮苗，防治病虫，抗旱排涝，促进早发快长早熟。

第四节　霜冻与冻害

一、霜冻的形成与危害机理

(一)霜和霜冻

霜冻是在接近0℃的零下低温下因植物体内冻结而产生的伤害。霜冻与冻害虽同属零下低温危害，但前者发生在植物活跃生长时期，而后者发生在作物越冬休眠或缓慢生长期间，由强烈的零下低温或变温所致。

较强冷空气侵袭而空气又比较湿润时，常在地面物体上看到白色的冰晶，称为“白霜”。北方春秋季空气干燥，有时虽无白霜，

但地面或作物表面温度仍可降到 0℃ 以下形成伤害，农民称为“黑霜”。由于凝霜释放热量和冰霜的隔热作用，白霜的危害往往不如“黑霜”大。空气和地表特别干燥的无风晴夜，叶面及地面最低温度会明显低于最低气温，如 1995 年 4 月 3 日北京西郊两者相差 9.6℃之多。即使气温在 0℃ 以上，地面或叶面仍可能降到 0℃ 以下而受冻。

按照霜冻形成的天气条件可以分为平流型(风霜)、辐射型(静霜)和混合型，前者由强冷空气入侵剧烈降温引起，以迎风面最严重；辐射型是在冷高压控制下地面和作物表面夜间强烈辐射降温形成，通常无风或风力微弱；生产上最常见的是混合型。

(二)霜冻对农业的危害

霜冻是中高纬度地区常见的自然灾害，中国每年受害范围都在几十万平方千米以上。霜冻对作物的危害早在 3 000 多年前的甲骨文中就有记载，秦汉之际“霜降”已成为二十四节气之一。黄淮平原春霜冻对小麦的危害十分严重。新中国成立以来最严重的霜冻灾害发生在 1953 年和 1954 年的 4 月中旬，黄淮平原连续发生大范围晚霜冻害，最低气温 −1～−1.5℃，受冻面积合计 600 多万 hm^2，占当年全国受灾面积的 1/4，仅冬小麦就减产 30 亿 kg，华北小麦平均减产 2 成以上。1960 年 9 月中旬的早霜使西北大部棉花冻死，纤维品质低劣，产量下降。1995 年 9 月华北北部和辽宁、吉林西部严重霜冻，粮食减产数十亿 kg。长江流域的霜冻以早春为严重，主要危害早稻秧苗和蔬菜。华南的霜冻主要发生在冬季和早春，常给热带、亚热带作物和果树、蔬菜造成严重损失，1996 年 2 月中下旬强冷空气南下，伴随着霜冻、冷害和冻害，经济损失在 40 亿元以上。青藏高原等高海拔地区的霜冻主要发生在夏季和初秋，对谷物的灌浆威胁很大。

(三)霜冻发生的条件

1.植物本身的状况

植物的抗寒力不足和一定的低温相结合才能形成霜冻，二者缺一不可。出现零下低温而未发生霜冻有以下几种情况：①农田休闲；②农作物处于越冬休眠或比较耐寒的发育阶段；③种植耐寒作物或品种；④低温未超过植物能够忍受的程度。

霜冻的发生还与作物生育期所处季节有关。从图 5－6 可以看出，哈尔滨的春小麦受霜冻危害较轻，因为春季植株抗寒力较强，拔节后抗寒力减弱，但小麦在秋霜冻之前已经成熟。而玉米、高粱、大豆等苗期遇春霜冻的概率是 10%，灌浆期遇秋霜冻的概率是 20%。播种越早，春霜冻发生的概率增大；反之，遭遇秋霜冻的概率增大。江南实行三熟制地区的小麦、油菜或甘薯遇春霜冻的概率较高，由于冬暖提前拔节或抽薹的小麦或油菜受害尤其严重，而双季稻受霜冻危害的概率较小。

2. 植物的体温

严格地说，发生霜冻并不取决于当时的气温，而取决于植物的体温。植物体某一部位的体温是与外界能量交换的结果。植物体的能量平衡包括辐射平衡 R、与周围物体的显热交换 H 和潜热交换 λE 3 项，共同决定着植物的体温。

$$R + H + \lambda E + \theta = 0 \qquad (5-1)$$

式中 λ 为单位水量的蒸发热；E 为水分蒸发或凝结量；θ 为植物体的储热。

冯玉香等推导出在晴朗无风天气下的植物体温(以叶片为例)的计算公式：

$$T_l = T_b + \frac{R + \frac{1}{A}\int_V c_1\left(\frac{\partial T_l}{\partial t}\right)\mathrm{d}V}{\rho_a c_p K_h\left(1 + \frac{S}{P}r_s\right)} \qquad (5-2)$$

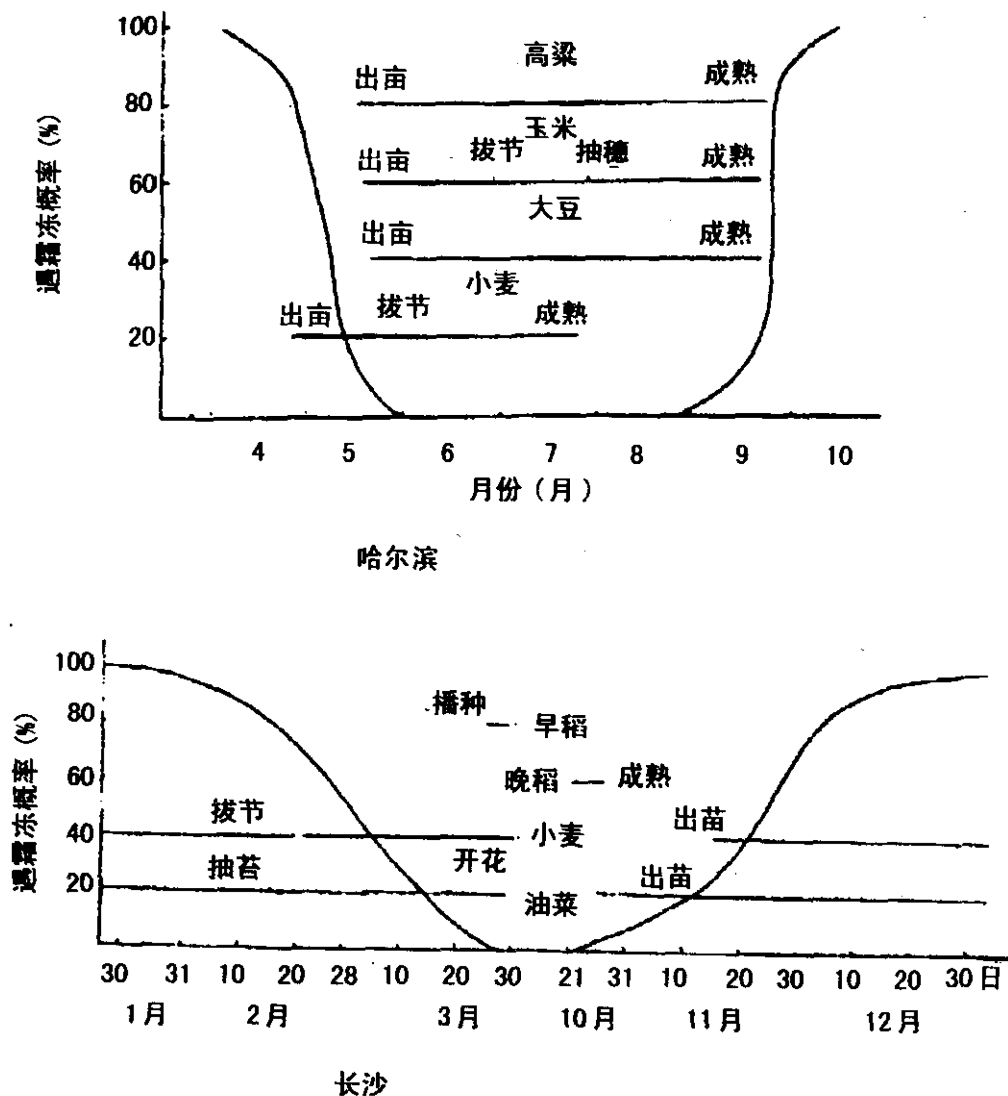


图5-6 哈尔滨和长沙主要作物的生育期与遇霜冻概率
（据冯玉香 1996）

式中 T_1 是植物体温；T_b 是叶边界层外的气温；c_1 是定容比热；K_h 是 h 高度上的叶边界层平均传导力；S 是气温－饱和水汽压曲线的斜率；p 是大气压力；r_s 是干湿球常数；V 是器官体积；A 是叶片表面积；ρ_a 是空气的密度；c_p 是定压比热。

作物不同部位的体温不同。由于面积大和不受遮蔽，叶片在夜间辐射散热多；又由于叶片薄，很难获得植株体热的传导，清晨

植株顶部叶温一般都要低于同一高度的气温。最低叶温与地面最低温度的差值要比与最低气温的差值小，在地面湿润时，最低地面温度可高于叶温；但地面干燥时，地面最低温度往往低于叶温。

3. 前期条件的影响

前期温度异常偏高，植物处于活跃生长状态，抗寒力差，遇强烈降温容易遭受霜冻害。

氮素养分过多，细胞液糖分少浓度低，会使植株的抗寒力下降。

（四）霜冻与冰核

1. 植物的结冰过程

植物具有保持过冷却状态的能力，植物体内的实际结冰温度通常都要低于0℃。冯玉香等用水滴与白菜叶片进行降温诱导结冰试验，水滴由于表面张力的作用，到－2.5℃时开始结冰，而白菜叶片要到－5.0℃以下才开始结冰（图5－7）。但过冷却水一旦发生核化作用，冰晶会迅速生长，在短时间内全部结冰。从水滴或叶片的温度变化曲线都可以看出由于结冰释放潜热形成瞬时温度跃升。一旦某个部位结冰，冰晶就会在体内沿细胞间隙生长，逐步向其他部位延伸，直到体温高于结冰温度的部位为止。冰晶的生长速率与温度的下降成指数曲线关系，温度越低，冰晶生长速度越快。植株越干燥，冰晶的生长越慢。

2. 冰核物质的成冰作用

纯净的水要在很低的温度下才能结冰，当温度下降到一定程度，在某些有结构的物质作用下，水分子之间能够从无序走向有序而迅速结冰，这种能诱导结冰的有结构物质称为“冰核”。按照冰晶排列的水分子本身可以作为冰核，称为“同质核”。表面结构类似冰晶，能够诱导水结冰的其他物质为“异质核”。碘化银和高岭土具有很强的冰核作用，可用于人工增雨作业。在自然界最常见的冰核物质是某些细菌，称为“冰核活性细菌”。孙福在等已在各

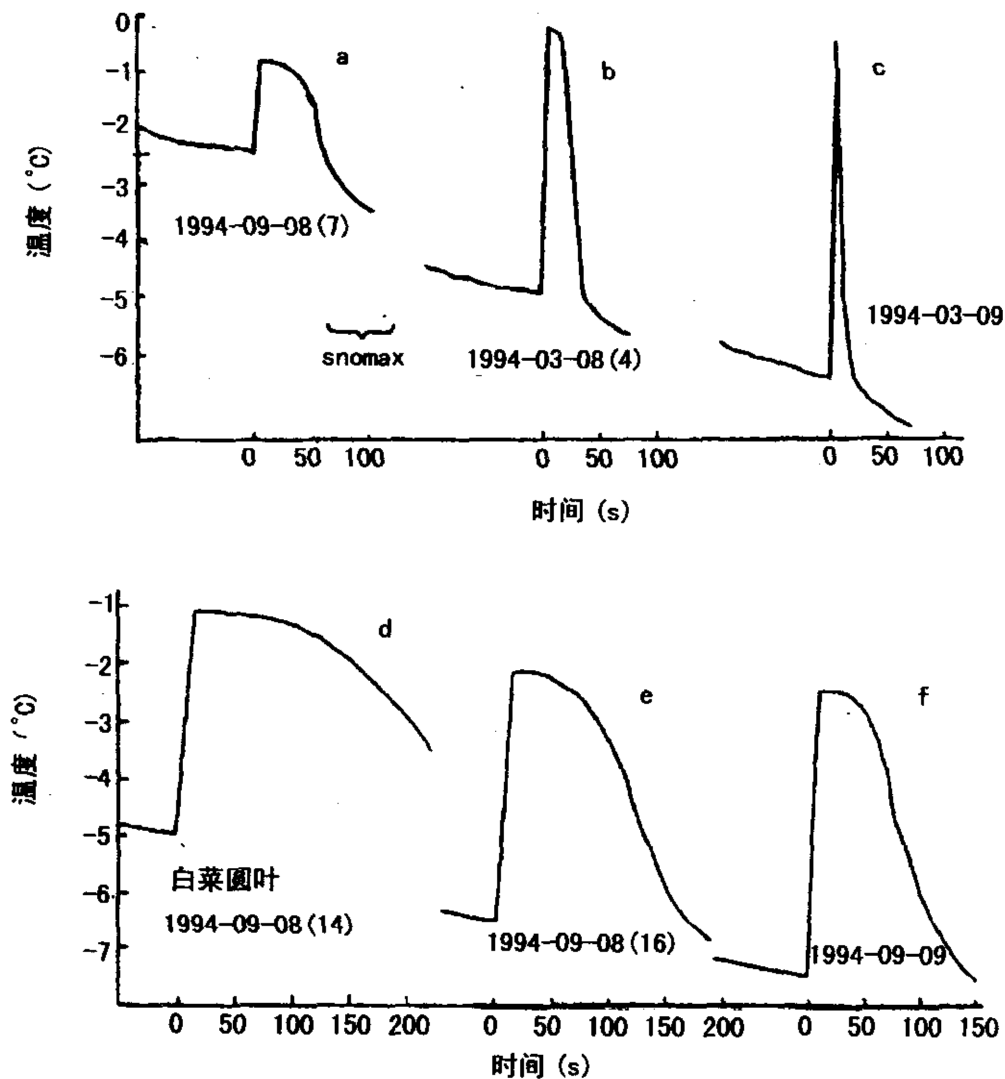


图 5－7　水滴和白菜叶片的冻结温度变化曲线(据冯玉香　1996)

地广泛采集到不同植物的冰核细菌，分属 3 个属 17 个种及变种，以草生欧文氏菌和丁香假单胞菌为最多，占总数的 78%。不同植物的代谢产物不同，形成不同的冰核细菌种群。与作物霜冻有关的冰核还有地衣冰核和真菌冰核。

作物的冰核数量还随季节和天气变化，20℃以下随温度下降冰核数量增多，较大降雨后和有机质多的土壤上植物冰核数量也较多。低洼地植物冰核细菌多于平地，这可能是洼地霜冻害严重

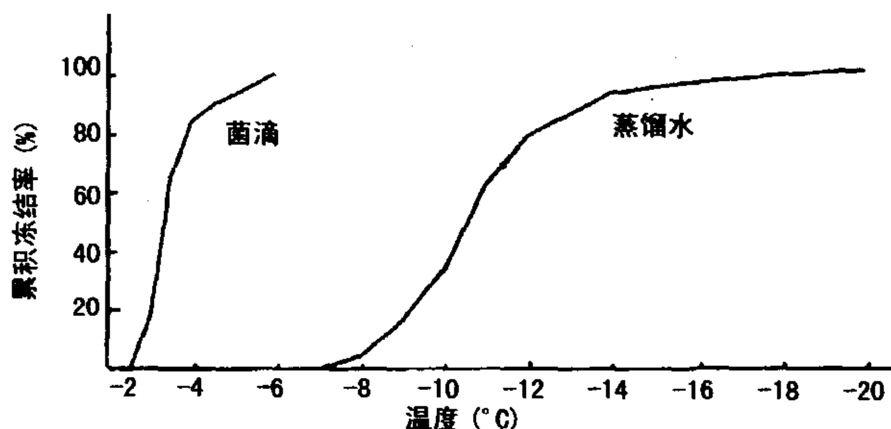


图5-8 草生欧文氏菌滴和蒸馏水的累积冻结率与温度的关系

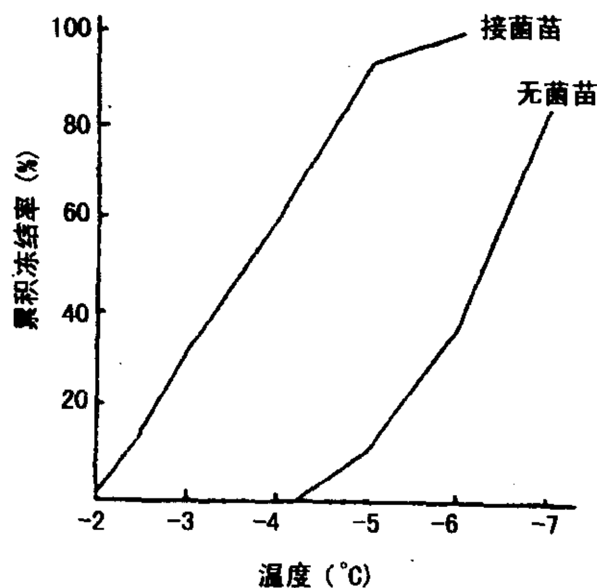


图5-9 接种冰核菌的玉米苗和无菌苗的累积冻结率与温度的关系

的原因之一。

3.冰核的活性

国内外研究指出细菌冰核的核化温度要高于地衣冰核,更高于真菌冰核。现有的各种冰核菌都能在-5℃以上诱发结冰(图5-8、图5-9),不同种属的冰核细菌活化温度不同,高的可达-1℃,低的在-5℃左右,活性越强活化温度越高。冰核细菌的密度越大,结冰温度也越高。

相同土壤和气象条件下生长的作物,由于其生物学特性和代谢产物不同,适宜不同种属的冰核菌附生和繁殖,其成冰活性不同,使不同作物的结冰温度产生差异。有些冰核细菌本身又是作物的病原,当叶片

存在致病冰核细菌的时候，霜冻可诱发病害，病害又可加重霜冻危害。

二、霜冻的时空分布

(一)初霜、终霜与无霜期

中国大部地区霜冻发生在春季农作物生长初期和秋季农作物生长末期，分别称为“春霜冻”和“秋霜冻”。春霜冻越迟，或秋霜冻越早，受害越重。通常春季最后一次霜冻和秋季第一次霜冻的危害特别大，分别称为“终霜冻”和“初霜冻”。终霜冻和初霜冻之间的时期称为“无霜期”，是喜温作物的可能生长期，反之称为“有霜期”，只能种植耐寒作物。华南的冬季作物仍活跃生长，在强冷空气南下时可发生霜冻。青藏高原夏季也可能发生霜冻。

(二)霜冻的时间变化

1.初霜日和终霜日的年际变化

平原地区的高纬度年际变化小于低纬度，这是因为春秋季强冷空气入侵时高纬度地区都出现强烈降温，而低纬度地区有暖湿空气活动，不一定都能形成强烈降温。高原的年际变化大于平原，是因为气温的日较差特大。各地终霜日的年际变化一般都大于初霜日，这是因为中国的冬季风强于夏季风，秋季干冷空气很快可横扫大半个中国，而春季暖湿空气北上要长时期拉锯。无霜期长度的年际变化更大，何维勋统计大多数地区最短无霜期要比平均无霜期短 1 个月以上，黔东南、湘北、河西走廊、新疆和青海大多超过 1 个半月，是当地农业生产的一个不稳定因素。他在对各地霜冻日期资料进行功率谱分析时发现，以 2～3 年的周期为最明显。

2.气候变化对霜冻日期的影响

暖期中初霜冻发生较晚，终霜冻结束较早，对农业生产有利；冷期中则情况相反，无霜期较短，低温灾害频繁发生。从北京气象台近 50 年资料可看出，50 年代和 60 年代是相对冷期，初霜冻发

生较早，终霜冻结束较迟；70 年代以后气候有变暖趋势，无霜期明显延长(图 5－10)。

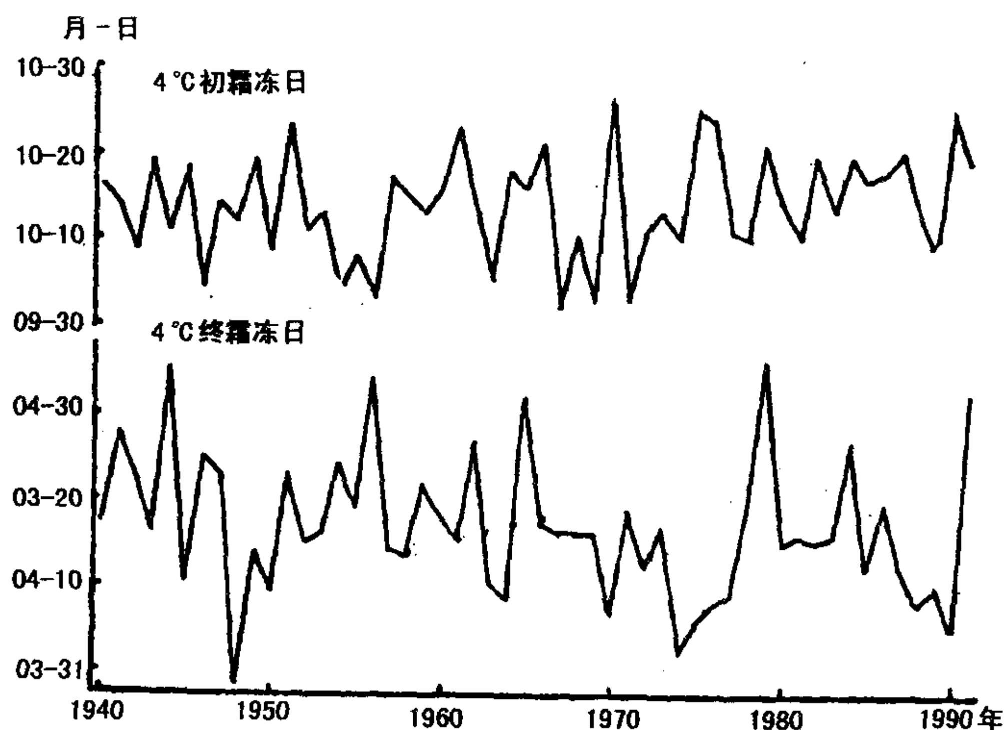


图 5－10 北京西郊历年初终霜冻日的年际变化(以最低气温 4℃为霜冻指标)

气候变暖似乎应使霜冻灾害减轻，但实际有些地区还有加重的趋势，其原因有自然因素，也有人为因素：①总的趋势是初霜更晚，初晚更迟，但又存在不稳定的倾向，有些年份出现异常晚霜和异常早霜。1989 年张北坝上部分乡村竟在盛夏的 7 月 27 日发生严重霜冻。②如霜冻发生前温度持续偏高，农作物活跃生长，发生霜冻的伤害就更严重。③农民为利用气候增加的热量，自发将喜温作物种植界限北移，改用生育期更长或抗寒性稍差但丰产性更好的品种，将春季作物播栽期大大提前或将秋季拉秧期大大推迟，人为加剧了霜冻危害。④地膜覆盖虽可增温保墒和增产，但并不能使地膜外幼苗的最低温度升高。在持续阴冷天气，塑料棚面夜间辐射降温，棚内甚至可出现比棚外更低的温度。

(三)霜冻的空间分布

1.不同季节的霜冻地区分布

何维勋对全国 1953～1992 年间霜冻逐月覆盖面积(图 5－11)进行统计分析,除青藏高原外,东北北部、华北和西北的高海拔地区 8 月份也可能出现初霜冻,但仅见于个别年份,受害面积较

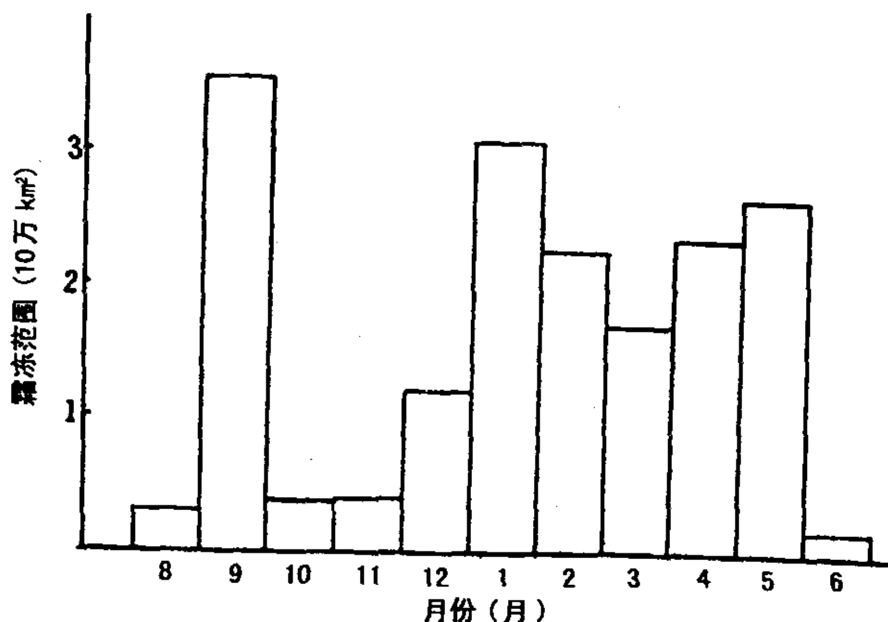


图 5－11　月霜冻范围面积的多年平均值

小。9 月北方秋收大忙,又是夏季风向冬季风转折的关键时期,中高纬度陆地降温迅速,东北、华北和西北大部霜冻频繁,是全年霜冻危害的高峰;10 月份发生初霜冻主要是华北和黄淮平原,由于以小麦—玉米两熟制为主,秋粮已收获完毕,小麦苗期又相当耐冻,霜冻灾害较轻。11 月霜冻推进到淮南到南岭的广大地区,水稻已收割,田间以小麦、油菜等耐寒作物为主,霜冻灾情也不严重。12 月霜冻危害地区主要在华南的中北部,受害稍有加重。1 月是冷空气最强盛时期,霜冻扩展到华南南部,仅海南岛、台湾南部及南海诸岛能够幸免。由于热带、亚热带经济作物极不耐寒,喜温蔬菜活跃生长,小麦和油菜也已拔节或抽薹,抗寒力下降,形成霜冻为害发生的又一个高峰期。2 月份霜冻害发生范围扩大到整个江

南和华南大部，但冷空气减弱，损失略低于上月。3月的范围为江南到黄淮，发生次数虽多，但受害面积较小。4月份霜冻范围进一步扩大，从长江中下游到华北平原北部、西北大部，西南局部也有发生。5月份霜冻范围为华北和西北中北部及东北大部，由于春播作物大多出苗，霜冻危害加重，成为春季霜冻灾害的高峰。6月各地气温已相当高，仅个别年份高纬度高海拔地区发生霜冻危害。

2.无霜期的地区分布

纬度和海拔越高，春霜冻结束越迟，秋霜冻开始越早。长城以北春霜冻4月中到5下旬结束，秋霜冻9月上旬至10月上旬开始，无霜期不到180天。黄河流域春霜冻在3月中旬到4月上中旬结束，秋霜冻在10月中旬到11月上旬开始，无霜期180～250天。长江流域春霜冻2月下旬到3月中旬结束，秋霜冻11月下旬到12月上旬出现，无霜期250～300天。华南没有明确的初霜冻期和终霜冻期，其南部终年无霜。青藏高原大部终年有霜。

3.霜冻发生与地形的关系

低洼地易积聚冷空气，常出现很低的温度，容易发生霜冻。山坡上冷空气不易积累，夜间辐射降温时常在某一高度出现逆温层，是种植喜温作物相对安全的地带。大的水体旁由于水的热容量大温度较稳定，也不易发生霜冻。林中的空地与洼地相似，也容易发生霜冻。砂性、盐碱地和干燥土壤导热快，要比黏性和湿润的土壤更易发生霜冻。

三、霜冻的防御对策

对于霜冻灾害首先要立足于防，其次在霜冻后要及时补救。许多抗霜措施的成本极高，只能用于少数经济作物。防霜、抗霜及霜后的补救措施如下。

(一)防霜冻措施

①选用耐寒作物和品种。

②促进抗寒锻炼，培育壮苗，提高植株抗寒力。避免在霜冻之前过多施用氮肥。

③选择背风向阳的避冻地形，营造防护林和风障。

④喷洒抑制冰核活性细菌的药剂，以降低冰点温度。

⑤合理安排播种和移栽期，使作物对低温的敏感期避开霜冻。

⑥对作物进行临时覆盖、包扎等保护措施。

（二）抗霜冻措施

①在夜间气温下降到临界受害温度之前通过熏烟、加热或鼓风来避免植物体温的进一步下降，一般仅用于价值很高的经济作物。

②在霜冻前一天浇水，以稳定地温；或在霜冻即将发生时喷水，以保护植物的花、果。

（三）霜冻之后的补救措施

①评估灾情，做出改种或补种的决策。

②对有可能恢复的植株及时施肥浇水，促进恢复生长。

③喷施生长调节剂，促进受害部位的生长和受精、坐果。

四、冻害的形成和危害机理

（一）冻害对农业的危害

冻害指植物在越冬休眠或缓慢生长期间受零下强烈低温的伤害，主要发生在越冬期和早春。冻害可造成植株或部分器官及组织死亡，未致死的植株长势衰弱，最终仍将导致减产。

世界上冻害以高纬度和高海拔地区为最严重，中国的大陆性季风气候也使越冻害要比世界上同纬度国家更为严重，并导致多年生喜温作物的分布北界纬度明显偏低。如柑橘欧洲可在北纬40°种植，中国在28°以南种植才较安全，只有三峡和湖滨少数地区依靠有利地形，柑橘种植纬度较高。俄罗斯等高纬度大陆性气候国家冻害也很严重。美国纬度与中国相近，但它缺乏东西向高大山脉，冬季强冷空气可长驱直入，东部地区的果树越冬冻害之严重

更甚于中国,但由于冬雪较多,小麦越冬冻害轻于中国北方。冻害是中国北方小麦最严重的灾害之一,严重冻害年份有1957,1961,1968,1969,1977,1980,1988和1994等年,华北大白菜砍菜期冻害有1968,1979,1993等年。南方柑橘地严重冻害有1954～1955,1968～1969,1976～1977,1990～1991等年;北方果树严重冻害年有1947～1948,1956～1957,1969～1970,1976～1977,1979～1980,1993～1994年等。

(二)冻害的发生机理

1.植物冻害的细胞生理

关于植物冻害的细胞生理机制,19世纪就有人提出细胞间隙结冰可导致原生质严重脱水致死,后来杜曼诺夫指出只在细胞间隙结冰不会造成死亡,植物因冻死亡的原因是细胞内结冰。马克西莫夫1913年提出保护物质提高了细胞液浓度,使冰点下降。随结冰时间延长,细胞原生质会因严重脱水而致死。但后来人们发现糖溶液至多能使冰点下降到－5℃,其他保护物质也不足以解释耐寒植物所能达到的抗寒力水平。莱昂斯提出温度下降到受冻的临界温度时,生物膜首先发生脂膜的物相变化,从液态变成凝胶态,引起代谢失调。如低温强烈且持久,生物膜便发生降解,形成不可逆的伤害。帕尔塔和李本湘进一步指出是膜的蛋白质部分变性受损,使主动运输系统钝化,离子大量渗出。关于生物膜受损的假说较好地解释了细胞冻害的机理。

2.冻害发生的生态环境

(1)气象条件　冬季强烈和持续的低温,反常回暖后的急剧降温,高寒地区积雪不稳定,都能导致植物冻害。

(2)土壤条件　砂性土壤和盐碱地以及缺乏有机质、结构不良、板结和多裂缝的土壤更易发生冻害。

(3)水分条件　水分过多可形成冻涝或掀耸;土壤过分干旱,积雪时间过长或形成冰壳都可导致死苗。

(4)生物条件　品种抗寒性差,冬前抗寒锻炼不足,前期施氮肥过多,生长过旺或苗太弱,受病虫害侵袭,冻害都会加重。根颈等关键器官或部位的入土深度对安全越冬影响很大。

3.植物的冬前抗寒锻炼

杜曼诺夫于20世纪30年代提出植物抗寒锻炼两阶段的学说,认为第一阶段是养分积累和转移,大致为日平均气温从5℃下降到0℃,作物的生长趋于缓慢,光合产物和茎叶养分向根颈部输送和转移;第二阶段为细胞原生质脱水浓缩,使冰点进一步下降,大致为日平均气温从0℃到-5℃。威舌尔1970年提出温带木本植物冬前锻炼分3个阶段,有明确的顺序性。第一阶段由短日照和停止生长引起,主要是淀粉水解和还原糖及可溶性蛋白质的累积;第二阶段由低温和代谢变化引起,磷脂的变化使细胞适度脱水使抗寒力增强;第三阶段由长时间处于低温引起,可增加水分子的表面影响以抗过度脱水。如不能通过前一阶段,则下一阶段的锻炼就不能进行。秋季气温持续稳定下降,日较差大,日照充足,土壤适度的干旱有利于顺利通过抗寒锻炼。反之,前期温度偏高,气温骤然急降,土壤过于湿润,光照不足,则抗寒锻炼较差。

(三)越冬冻害及有相关越冬灾害的类型

(1)冬前剧烈降温　有人称为秋季冻害或初冬冻害,虽然不一定立即造成严重伤害,但由于植株缺乏抗寒锻炼,土壤缺乏冻融,结构不良,可极大地增加越冬冻害的风险。如华北历次小麦严重冻害,大都伴随入冬剧烈降温。抗寒锻炼极差的年份,即使暖冬也可能发生比较严重的冻害。

(2)冬季长寒　统计分析表明,北方冬小麦单产与冬季负积温间存在显著的相关,冬季低温越强烈且持续越久,受害越重,表明冻害是一种累积型灾害。

(3)融冻型　反常回暖植株抗寒力下降之后,再出现强烈降温,不需要太低的温度就可造成伤害,在北方的后冬和早春,南方

的冬季都可能出现。

(4)旱冻型 北方冬季表土常形成一风干土层，当植株根颈长期处于干土层中严重脱水后，到早春往往难以恢复，可因养分耗竭而死亡。

(5)冰壳害 冬前浇水过量或早春大量融雪后冻结形成冰壳，可使作物窒息死亡。

(6)冻涝害 过量水分在冻层以上聚积成涝，使植株窒息或行无氧呼吸，养分消耗过多或中毒死亡。

(7)雪害 冬季积雪超过5个月，可造成养分耗竭或雪腐病、雪霉病等，导致死亡。

(8)掀耸根拔 下层土疏松，表层积水结冰，如根系较弱可整株被掀拔，露出地面风干或冻死。

(9)积雪不稳定型 新疆北部主要依靠积雪保护小麦越冬，如稳定积雪形成前已出现强烈低温，或积雪较薄，或化雪后再出现强烈降温，都可造成死苗。

(10)抽条 指林木在后冬和早春因根系不能吸收冻结水分，或因干燥多风和升温蒸腾失水，造成枝条或主干枯死的现象。以嫩枝和幼树受害最重。

(11)日烧 果园或森林边缘的树干基部，在冬季夜间强烈降温和白天直射阳光作用下，不均匀地反复胀缩导致断裂的现象。

(12)冰凌 冻雨在树木枝条上大量凝结，使之折断。在南方山区和东北北部常见。

在生产上发生的严重冻害通常都同时具备上述2种以上的类型特征。

五、主要作物冻害的时空分布及指标

(一)作物的冻害指标

虽然高纬度与高海拔地区的冬季更加寒冷，但一般不种植越

冬作物，除林木冻害外，在生产上冻害损失一般都不如暖温带和亚热带地区严重。

作物冬季冻害与严寒程度及持续时间有关，可用冬季负积温、有害积温和极端最低温度为指标。早春冻害常以稳定通过某一界限温度之后的极端最低温度为冻害指标。旱冻型冻害还要考虑干土层厚度。不论何种作物，都可用50%植株死亡的临界致死温度作为其冻害指标。这一指标主要取决于作物种类及品种特性，即主要由其遗传特性决定，但也与抗寒锻炼程度、苗情壮弱、发育阶段、养分状况等有关。

(二)越冬大田作物的冻害

冻害是北方小麦生产上最严重的灾害，1977年和1980年都曾发生数百万公顷小麦受冻，导致全国小麦减产。80年代以来北方冬季变暖，生产条件改善，大面积毁灭性死苗已很少出现，但冻伤导致成穗减少和粒数下降仍很常见，加上现有推广品种抗寒性普遍降低，冻害危险仍然存在。

小麦越冬冻害最严重的地区是华北北部、黄土高原中北部及新疆北部等冬小麦种植北界地区，大致3～4年一遇。华北平原、黄土高原中南部和新疆南部大致5～8年发生1次比较严重的冻害。黄淮平原和长江中下游以早播麦受冻为主，受害较轻。小麦冬季分蘖节的临界致死温度品种之间差异很大，如前苏联的米罗诺夫808等可达－26℃，但弱冬性品种只有－7～－8℃。

油菜冻害以华北南部和黄淮平原为最严重，与该地区小麦冻害基本一致，抗寒力一般稍差于小麦。

(三)果树和林木越冬冻害

华北较严重冻害约10年1次，如1947～1948，1956～1957，1967～1968，1976～1977，1985～1986，1993～1994等年。1976～1977年的冻害遍及全国大部。以山区冷空气易进难出地形最容易受害。果树冻害的形态多样：

(1)树叶冻害　抗寒锻炼不足，秋季急剧降温时，树叶未变黄就青枯，叶柄与枝条间未来得及形成离层，枯叶仍挂在树上。虽对树无直接伤害，但树叶养分未能向枝干转移，将影响到冬季的抗寒能力和来年春季的生长势。

(2)嫩枝冻害　生长较晚发育不成熟的枝条易受冻害，冬前徒长的在越冬期常整枝变褐枯死。

(3)枝条冻害　正常枝条在强烈低温下也会受冻害，外观不明显，内部变褐，严重时形成黑心。虽不致死亡，但木质部导管堵塞，水分养分输送受阻，发芽延迟，叶片瘦小畸形，再遇严寒容易冻死。

(4)桠杈冻害　分枝交叉处树体停止生长晚，抗寒锻炼差，受冻后局部组织死亡，严重时整枝死亡。

(5)树干皮层冻裂　树干阳面和阴面受热不匀，内胀外缩时皮层易开裂，在苹果和梨树上经常发生。

(6)根颈冻害　抗寒锻炼不足休眠较晚，早春过早解除休眠，抗寒力进一步下降，近地面的根颈温度变化剧烈，受冻后皮层发黑死亡，轻的仅在局部，重的形成黑环，直到全树死亡。

(7)根系冻害　皮层变褐，与木质部分离甚至完全脱落。

(8)花芽冻害　多数果树花芽冬前已形成，冬季或早春反常回暖后花芽萌动，再遇强冷空气可受冻，严重时干枯死亡。有时仅花原基受冻发育迟缓或畸形。花芽后期受冻柱头黑枯不能授粉结果。

许多树木冻伤后还发生腐烂病经久不愈。

耐寒苹果品种的枝条可抗－40℃低温，一般果树冬季只能抗－20～－30℃低温。

南方果树和林木发生冻害的树种以柑橘为主，枇杷、茶树等也时有发生。冻害是柑橘生产上最大的灾害。建国以来最严重的冻害有1954～1955，1968～1969，1976～1977，1991～1992和1993～1994等年度。1991年12月中下旬江西中部出现－15℃的创记

录低温，使经营千余年的古柑橘园毁于一旦。不同种类及品种间抗寒力相差很大，以金橘类最耐寒，可抗 -10℃以下低温，受冻后恢复能力也最强；依次是宽皮橘橙类、柚类；耐寒力最差的是柠檬和枸橼类，在 0℃左右就要受冻。

（四）蔬菜越冬冻害

主要发生在北方和长江中下游。华北的蔬菜越冬冻害主要是根茬菠菜、芹菜等，而越冬韭菜、大葱等有足够的抗寒能力，从不发生冻害。根茬菠菜是华北早春的主要蔬菜，菠菜发生冻害死苗，大大加重了春淡季的菜荒。北京地区 1980 年的严重冻害使菠菜死苗 7 成以上，大部地块基本绝收，不得不改种。长江中下游露地越冬蔬菜有白菜、菠菜、芹菜等。越冬冻害是长江中下游有些年份早春淡季蔬菜严重的主要原因。由于平原地势开阔，冬季强寒潮能长驱直下，1977 年武汉出现过 -17℃，南京出现过 -15℃，上海出现过 -12℃的低温，使越冬叶菜严重受冻。至于西南和华南由于冷空气不易侵入，冬季一般不发生冻害。东北和西北一般冬季不进行露地生产，也不存在越冬冻害问题。长江流域的越冬蔬菜一般在 -3～-7℃受冻，北方的尖叶型根茬菠菜可抗 -20～-30℃，但在旱冻交加时临界温度明显提高。

（五）大白菜砍菜期冻害

大白菜砍收期冻害在北方各地都可发生。西北、东北发生在 10 月中下旬，华北北部发生在 11 月上中旬，黄河流域发生在 11 月中下旬和 12 月上中旬。1979 年北京市大白菜包心良好，全市总产 4 亿 kg，经 11 月中旬冻害后有 60%以上受害，其中严重掉帮烂菜 1.5 亿 kg，完全不能食用的 0.5 亿 kg 以上，是导致 1980 年冬春严重菜荒的一个主要原因。大白菜受冻害时先是裸露外帮冻伤，随着低温强度加大、时间延长，逐渐冻透里帮，严重的直至菜心。大风可加快散热、加重冻害，并加剧水分丧失，使受冻白菜难以恢复。

大白菜砍收后含水量虽达90%~95%，但其叶片层层叠抱多褶皱和空隙，使叶球成为热的不良导体。温度下降外叶结冰时心叶仍在冰点以上甚至保持0℃以上。外叶水分结冰时也释放潜热，延缓了降温速度，所以只有在持续多日、连续降温到-5℃以下才可能冻透多层菜叶，形成较严重的冻害。

六、冻害的减灾对策

(一)抗寒品种的选育、鉴定与布局

抗寒性强的品种具有根颈、生长点或枝条临界致死温度低，抗脱水能力强；冬性强，冬前生长慢，不易过早返青和进入生殖生长；细胞小，气孔密度大，叶片栅栏组织细胞层多、厚度大等特征。果树应选抗寒力强的品种作为砧木高接。

品种合理布局是减轻冻害的关键措施。如在冬小麦种植北界应使用冬性极强品种，冬麦区北部使用强冬性品种，华北南部和黄淮平原使用冬性和弱冬性品种，长江流域使用弱冬性和春性品种。

利用有利地形也是合理布局的重要内容，如合理利用山坡的逆温层、水体旁边和背风向阳等地形。山区冷空气难进易出地形，其冬季最低气温要比冷空气易进难出地形高出3~3.5℃。如长江三峡地区成为中国纬度最北的优质甜橙种植区。易受冻果园应种植防风林和设置风障。

(二)提高播种质量和培育壮苗

小麦、油菜、蔬菜等播种过浅，分蘖节或根颈也浅，越冬容易受冻。播种过深，则苗太弱、养分积累少，也不利于越冬。以适时播种，冬前达到适宜的苗龄最有利于越冬，如小麦冬前叶龄华北地区以主茎6~7叶为好，黄淮海麦区以5~6叶为好。过早播种常导致徒长，植株抗寒力差，分蘖节或根颈入土变浅。播种前的整地质量和底肥数量、质量对冬前壮苗和抗寒力的形成影响也很大。小麦实行沟播有利于壮苗和入冬后加深分蘖节。蔬菜育苗在移栽前

要适时放风炼苗。果树秋季要控制水肥，防止枝叶徒长，促进抗寒锻炼。

(三)越冬防冻保苗

北方小麦、油菜和菠菜在入冬前一般要在日消夜冻之际适量浇冻水，以利形成“上虚下实”的良好表土结构。冬季镇压和适当轻耱可弥缝保墒和破除坷垃。幼树和嫩枝冬季喷涂防抽条剂可减少水分损失。越冬蔬菜和华南的热带、亚热带作物还可采取覆盖措施，包括覆盖地膜或秸秆、盖土、泼泥等。果树秋冬适当剪枝减少蒸发，冬前适时浇足冻水，树干涂白防日烧冻裂。高寒地区如东北和新疆北部，可选用具有一定抗寒力的丰产优质品种斜栽，经整形修剪后扣压直立枝条，在土壤开始冻结时埋土，全部埋没后再覆土 10～20 cm，春天解冻后及时撤土。华北可将树龄 1～2 年的年幼树弯倒埋土越冬，春季扒出。入冬后在树干以北 50 cm 处筑 60 cm 高半月形土埂，防风袭击，保护果树根颈。蔬菜可覆盖塑料薄膜或设风障。

(四)物理和化学抗冻

矮壮素拌种可加深分蘖节；氯化钙拌种可提高细胞液浓度；增施磷肥也可提高抗寒力。果树冬季喷涂防抽条剂可减少枝条失水。

(五)受冻后的补救

冬旱麦田应及早补墒或压麦提墒，使分蘖节吸收水分恢复膨压。受冻旺苗应尽早用铁丝耙子狠搂除去枯叶，可减轻冻枯叶鞘对心叶的束缚，减少死蘖。切不可仍当做旺苗控制水肥贻误时机。受冻弱苗经不起折腾，吸收能力也差，过早浇水追肥事与愿违，应浅松土提高地温，施优质有机肥和磷肥，等地温明显提高、新根长出再浇水，追肥量应随植株长大逐渐增加。多穗型品种存活茎少于 20 万，大穗型品种少于 15 万的可混种春小麦；分别少于 15 万或 10 万且苗弱的，一般已无保留价值，可及早改种早春作物或春

玉米。

北方果树对树干冻伤处应用药剂处理防止腐烂。柑橘受冻后要适时适量修剪，在新梢萌芽和生死分明时将枯死部分剪除，保留活枝梢。大的伤口涂刷保护剂，早春施肥促进树冠恢复，防治病虫害。适当疏花疏果，以节约养分和促进积累。

(六)建立防冻保苗综合技术体系

例如防御小麦冻害的策略是："采取综合措施，从 2 个方面入手，抓好 3 个环节，注意合理布局。"小麦冻害是植株抗寒性下降后遇不利越冬条件胁迫的结果，单一措施的效果是有限的，必须从提高植株抗寒性和改善越冬环境条件 2 方面着手，采取综合措施。3 个环节指提高播种质量培育冬前壮苗、抓好越冬保苗和早春抢救补救。合理布局包括品种、复种指数和种植制度的因地制宜。

种植园生态系统防御霜冻与冻害应建立负反馈机制，如图 5－12 所示。

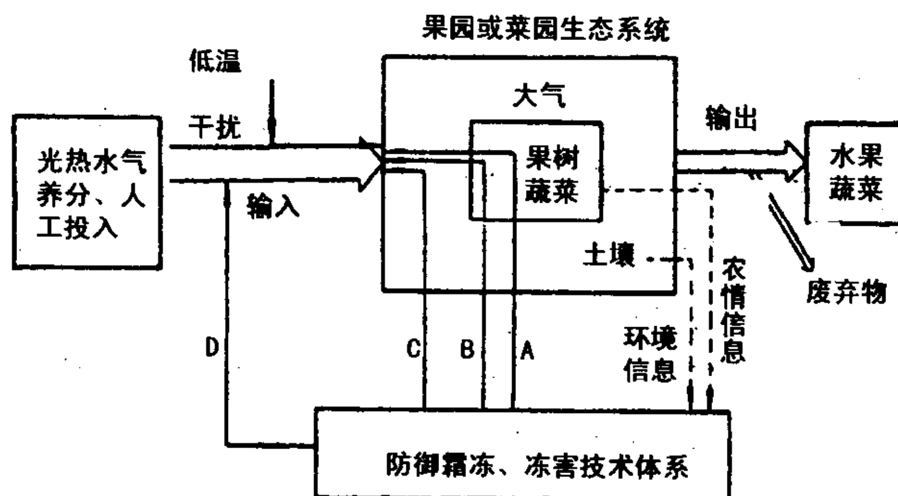


图 5－12 种植园生态系统防御霜冻与冻害的负反馈原理

A.抗寒育种 B.培育壮株和抗寒锻炼

C.调节小气候 D.改良农业生态环境

第五节　干热风和热害

一、干热风

干热风是一种高温、低湿并伴有一定风力的综合性灾害天气。它使植物蒸腾急剧增大，破坏植株体内水分平衡和光合作用，引起营养器官变干，影响农作物正常灌浆成熟，籽粒瘪小，导致产量和品质降低，甚至枯死。在群众中称干热风为"火风"、"旱风"、"热风"等。干热风出现在温暖季节，主要为害小麦的扬花灌浆，所以又称它为小麦干热风。

(一)干热风的成因和类型

1. 干热风的成因

每年5月中、下旬至6月上、中旬，是黄淮海冬麦区干热风发生和危害时期。该时期东亚大槽强度已明显减弱，主体东移。但在120°E附近尚留有小槽，中亚(70°～80°E)的高脊继续维持。同时由于青藏高原的存在，地形对西风气流的摩擦作用，在其东部的陕、晋、豫交界一带的低空，形成一个反气旋环流。在这个反气旋的南北两侧分别有1个锋区，对应于地面常有2条锋带，一条在40°N以北的内蒙古东北，另一条在华南。黄淮海地区处在高空槽后脊前的西北气流控制之下，低空和地面处在2条锋带之间的反气旋区内，天气晴朗，气温高，空气干燥，有利于干热风天气的形成或加剧。

在我国西北地区，干热风形成的天气系统主要是从中亚地区东移来的高压脊，在青藏高原和西北地区得到发展和加强。其次是青藏高原源地有暖高压脊发展北挺。受其影响的地区，中、低层气柱维待下沉气流，天气晴朗，且不断有暖平流输送，导致干热风的形成。在多情况下，西北地区的干热风是由上述两类过程的叠

加而形成的。

2.干热风的类型

干热风是温、湿、风3个气象要素对作物的综合危害。根据干热风气象要素组合对小麦的影响和危害的差异，我国的干热风主要有3种类型。

(1)高温低湿型　这类干热风发生时温度猛升，空气湿度剧降，最高气温可达32℃以上，甚至高达37～38℃，相对湿度可降至25%～35%以下，风力在3～4 m/s以上。但有的地区也可能是静风。地面风向有的地区吹西南风，有的地区吹东风或西北风。干热风结束后温度下降，湿度回升。这种高温低湿天气使小麦干尖、炸芒，呈灰白色或青灰色。这类干热风是北方麦区干热风的主要类型，发生的区域很广，能造成大面积小麦产量显著下降。在黄淮海平原地区，群众中有“麦怕四月(指农历)风，风后一场空”、“麦黄西南风，麦收一场空”、“三月西风麦头重，四月西风麦头空”等说法，都是描绘高温低湿型干热风对小麦生产的影响。

(2)雨后热枯型　这类干热风又称雨后青枯型或雨后枯熟型，一般发生在乳熟后期，即小麦成熟前10天左右，其特征是雨后猛晴，温度骤升，湿度剧降。有时是长期连阴雨后出现高温低湿天气，造成小麦青枯死亡。这种干热风主要是雨和热的配合对小麦发生危害。一般雨后日最高气温升至27～29℃以上，14:00相对湿度在40%左右，即能引起小麦青枯早熟。雨后气温回升越快，温度越高，青枯发生越早，危害越重。雨后热枯型干热风发生区域虽不及高温低湿型干热风广泛，但所造成的危害却比较严重，一般可使千粒重下降4～5 g以上，减产10%～20%以上。群众中有“麦怕杏黄雨”、“杏黄雨，杀麦刀”、“雨后东风杀麦根”等谚语。这里所说的“杏黄雨”、“雨后东风”皆指雨后热枯型干热风。

(3)旱风型　这类干热风又称热风型。其特点是大风与一定的高温低湿组合。它对小麦的危害除了与高温低湿型相同外，大

风加强了空气的干燥程度，加剧了农田蒸腾强度，使小麦叶片卷缩呈绳状，叶片被大风撕裂破碎。这类干热风主要发生在新疆和黄土高原的多风地区，多出现在干旱年份。

(二)干热风对小麦的危害

1.危害时期

小麦从开花到成熟期间都可能受干热风的危害。但其受害程度却因小麦生长状况和干热风强度而不同。从江苏省徐州农业气象试验站 1981 年 2 个小麦品种分期播种的灌浆速度资料来看，在小麦开花后 14 天以前，即籽粒形成期前，植株生长健壮，绿叶面积大，根系活力强，干热风频率小，强度也较弱，干热风对灌浆速度的影响很小，灌浆速度平缓地增长。而在小麦开花后 15～20 天以后，则随着小麦生理机能的逐渐衰老，绿叶面积减小，根系活力衰退，干热风加强，小麦受干热风的危害加重，灌浆速度下降值呈指数曲线增大，下降值在 −0.2～ −1.5 g/d。据统计，小麦灌浆中期(开花后 16～23 天)的干热风频率为开花至成熟期间的 50%，累计灌浆速度下降值为 38.2 g，平均每个干热风日下降 1.1 g；灌浆后期的干热风频率为 46%，累计下降值为 39.2 g，平均每个干热风日下降 1.2 克。由此可见，干热风对小麦危害的敏感期在开花后 20 天左右以后至成熟前，即灌浆中、后期至蜡熟期。

2.危害症状

正常成熟的小麦呈金黄色，俗话说“麦收三色”，即麦秆节间黄，节端绿；叶片黄，叶鞘绿；芒尖黄，芒根绿。叶、穗、秆柔软呈金黄色。小麦受高温低湿型干热风危害后，轻者芒尖干枯，炸芒，颖壳发白，叶片卷曲凋萎；重者严重炸芒，顶部小穗、颖壳和叶片大部分干枯呈灰白色，叶片可卷曲呈绳状，枯黄死亡(表 5 − 8)。

雨后热枯型干热风则使叶片脱水青枯死亡，颖壳和芒青干，颖壳闭合，粒离脐，穗下茎及茎节呈暗绿色。

干热风在不同发育时期发生，小麦的受害症状和受害程度不

同。干热风在开花和籽粒形成期发生，主要影响开花受精能力，使不孕花数增加，减少穗粒数；干热风在灌浆成熟期发生，则使灌浆速度出现突然下降现象，缩短灌浆期。在成熟前10天左右发生雨后热枯型干热风，则麦田会出现大面积青干枯熟。而且干热风越重，小麦受害症状越明显，千粒重越轻，减产越严重。

表5-8 小麦高温低湿型干热风危害的植株外形部态症状

观察地点	轻害症状	重害症状
山东菏泽	麦穗90%炸芒，旗叶干尖约2～3 cm	80%以上的植株枯死
河南郑州	60%～80%麦芒炸开，颖壳变白，旗叶卷曲，叶尖干枯1～2 cm	穗芒全部炸开，颖壳干白无光，穗下茎出现白色小斑点，籽粒瘪瘦，腹沟深
河北坝县	50%麦芒炸开，炸芒角度约20°～30°，旗叶凋萎卷曲，叶尖干枯1～2 cm，干叶面积达40%左右	80%麦穗炸芒，颖壳枯黄，旗叶黄枯面积达60%～80%，20%～30%植株死亡
内蒙古毕克齐	穗芒干枯50%～70%，炸芒角度大于30°，颖壳40%变白，旗叶50%变黄，倒2叶75%枯死	穗芒全部干枯，60%穗子呈灰白色，旗叶80%～90%卷曲干枯，茎秆呈黄白色
甘肃武威	穗芒干枯，颖壳变白，30%植株凋萎	穗芒全部干枯，穗子呈灰白色，50%以上植株凋萎
新疆乌拉乌苏	麦芒干尖发白，80%植株受害，叶卷曲，叶尖干枯1～2 cm	麦芒炸开，颖壳变白，叶片凋萎卷曲青干，呈绳状，籽粒皮厚腹沟深

3.危害机理

大量的田间试验和调查表明，干热风对小麦的危害主要是高

温引起的热害和低湿及风引起的旱害。小麦植株体在高温低湿持续胁迫到一定时间后,便发生细胞代谢紊乱,生理变化失调,这主要反映在以下几个方面。

(1)蒸腾失水加剧 正常的蒸腾作用是作物吸收和运输水水、养分的原动力,并可调节叶面温度,以促进光合作用。影响作物蒸腾强度的因素是温度、湿度和风力。当气温升高时,叶温也升高。叶温的升高会强烈地使叶内水汽压升高,叶子与空气之间的水汽压差增大,作物蒸腾强度因而增强。空气湿度反映大气的水汽压,在其他条件相同时,蒸腾强度决定于气孔下气腔的水汽压与外界大气水汽压之差,即二者水势之差。一般情况下,气腔中水势很高,接近于零值。因此,空气湿度越小,大气的水势越低,蒸腾强度越强。风的扰动能吹走叶面边界层的水汽,增大叶子内外的水势差,并减少边界层的阻力,从而促进蒸腾。小麦植株在干热风胁迫下,由于温度猛升,湿度骤降,加上风力的扰动,使蒸腾强度急剧增大。据测定,郑州742、泰山1号、徐州18号等品种在干热风胁迫下的蒸腾强度比无干热风时提高31.2%~66.7%。小麦植株持续一段时间高强度蒸腾后,叶、茎细胞间隙的水分减少,根系吸水受阻,水分供应和输送能力减弱,蒸腾强度又急剧下降。蒸腾强度的减弱,导致植株体的体温升高。植株体受高温危害,开始呈现死亡状态。因此可以认为,小麦在干热风胁迫下,蒸腾强度由强转弱,是小麦受干热风危害后趋于死亡的象征。

(2)根系活力降低 植物根系是吸收水分、养分的主要器官。伤流量是根系活力的重要生理指标。小麦在干热风胁迫下,蒸腾失水加剧,使根系周围的土壤含水量降低,土壤水势下降,根系吸水力减弱,水分收不敷支,造成植株体内水分严重亏缺。这种水分亏缺必然要传导到根部,而影响根系的代谢机能。据测定,在干热风胁迫下,小麦根系的伤流量减少20.1%~58.6%,根系吸收矿质元素的功能下降57%~72%,从而加速了植株体的早衰死亡。

(3)叶绿素含量降低　叶绿素是植物进行光合作用的重要物质。在小麦灌浆中后期,植株叶片有一个自然的缓慢衰老过程,叶面积和叶绿素含量也随之降低。而在干热风胁迫下,一方面使叶绿素迅速解体破坏,另一方面又使叶绿素的合成受阻,从而使小麦叶片中叶绿素含量明显降低。据北方13省(市)小麦干热风科研协作组1980年在干热风出现后第3天测定,叶绿素含量降低了57%,平均每天降低19%,叶片颜色呈灰白色,而1982年在无干热风条件下测定,叶绿素含量平均每天仅降低7%。

(4)光合速率下降　小麦粒重的2/3~4/5是由抽穗后光合产物积累的,所以灌浆期的光热条件、光合作用与籽粒形成和灌浆过程有密切关系。小麦灌浆的适宜温度为20~22℃,气温高于25℃,就会加速灌浆进程,提早结束干物质的积累和输送,缩短灌浆期。当最高气温升高到28℃左右时,叶片的光合作用受阻;最高气温升高至31~33℃后,光合作用则严重下降。据测定,泰山1号、徐州18号在最高气温由30℃升到34℃时,净光合强度、叶面积指数、植株含水率、籽粒含水率分别减少31%~45%、24%、5%~10%和6%~8%;当温度由34℃升到37℃时,上述各项分别减少48%~100%、72%~100%、19%~20%和15%~20%。由此可见,温度越高,叶绿素的破坏越快,光合强度下降越明显。安徽农学院人工模拟干热风危害的试验结果表明,高温低湿条件持续时间越长,小麦的净光合强度就越弱。小麦乳熟期在37~38℃的高温和相对湿度为35%的环境内持续1 h,旗叶的净光合强度仅为自然环境下的51.8%,持续1 h40 min,则下降为25.7%。

(5)灌浆速度减慢,灌浆时间缩短　干热风胁迫对小麦所产生的伤害,最终影响到光合物质的制造、输送、转移与贮藏,综合表现为灌浆速度下降、灌浆期缩短及粒重下降。如河北省坝县1977年6月6~8日出现干热风时,小麦正处于灌浆中期,唐山6898小麦粒重平均日增重(以千粒计)由2.3 g下降为0.6 g;泰山1号从

2.1 g降至0.6 g。

干热风胁迫不仅使小麦灌浆速度减慢，还使灌浆时间缩短，出现逼熟现象。如山东菏泽地区1978年无干热风，小麦自开花到成熟持续35天，而1980年在小麦乳期后期发生一次重干热风，开花灌浆成熟期缩短为30天。北方其他麦区也有类似现象。

(三)小麦干热风的时空分布规律

掌握干热风的时空分布规律，对于制定农业区划、规划，因地制宜地采取防御措施，具有实际的生产意义。

1. 干热风的时间分布

小麦受干热风危害的敏感期在开花后第16～20天以后，即小麦灌浆中、后期至籽粒成熟前期。因此，以当地小麦成熟前1个月作为干热风的发生时期。由于各地小麦的生育期不同，所以各地干热风的发生时期有很大差异。一般是从5月上旬开始由南向北、由东南向西北逐渐推迟，至7月中下旬终止；冬麦区早于春麦区。黄淮海平原冬麦区发生在5月上、中旬至6月上、中旬，以豫南、徐淮地区出现最早，在5月上旬至6月上旬；随后是豫中、豫东、豫北、鲁、冀南、冀中、关中、晋南，发生在5月中旬至6月上旬。上述这些地区干热风以5月下旬至6月上旬出现较多，这两旬出现干热风的次数约占总出现次数的80%～90%。冀北、晋中、渭北发生在5月中、下旬至6月中、下旬，以6月份发生最多，约占60%～80%。晋中、冀北、鲁东6月中旬出现干热风的概率最多，约占40%左右。

春麦区的宁夏平原、内蒙古河套等地区及甘肃河西走廊，干热风发生在6月中旬至7月中旬，各旬的干热风日数约各占30%左右，较为分散。新疆冬、春麦区以吐鲁番盆地发生最早，为5月中旬至6月中旬，各旬干热风日数的分配比较均匀。南疆发生于5月下旬至6月下旬，其中以6月干热风日数最多，约占70%以上；北疆发生于6月上、中旬至7月中旬，各旬各占30%～40%。

干热风是一种大范围的灾害性天气，其年际变化与春末夏初的大尺度天气变化有密切联系。有的年份干热风重，干热风日数和过程次数多；有的年份轻，或者无干热风。轻、重干热风年与无干热风年一般交替出现，每隔1～2年发生2～3次。根据对38个指标站的分析，1959～1978年间全北方麦区为重干热风年型的有1960，1961，1962，1965，1974年，黄淮海麦区的干热风日数为10～15天，过程次数为2～3次以上；河西走廊日数为5～15天，次数为2～3次；新疆境内差异较大，托克逊是年年为重干热风年，干热风日数为15～25天，过程次数为9～10次。轻干热风年型有1959，1963，1967，1968，1970，1971，1972，1975和1978年。无干热风年为1969，1973，1976，1977年。

2. 干热风的地理分布

地理环境条件是影响干热风危害程度的重要因素。分析研究北方麦区155个代表站20年的干热风资料，结果表明，北方小麦干热风通常是山脉的背风面比迎风面重，低洼盆地比坡地重。我国北方麦区的太行山东侧、晋南、祁连山北坡、阿尔金山北部等，都是由于干热气团越山后的焚风效应而使干热风的危害程度加重；山谷盆地由于周围坡地辐射增温，受热剧烈，加之干热风暖平流和地形的下沉增温减湿作用，以及闭合谷地对干热空气排泄不畅，也加重了干热风的强度和危害程度。因此，在北方干热风危害区域内，几乎所有的山谷盆地的干热风强度都比坡地和平地重，大都成为当地的重干热风区。干热风也受地势和海拔高度的影响。山地温度随高度增加而递减，湿润度则随高度增加而增加，因此，干热风随地势升高而减轻乃至消失。年干热风日数随海拔高度增高呈直线递减，但递减率和上限高度因山地类型而不同。干热风日数随高度的递减率在河西走廊最小，每升高100 m减少0.9天；以天山南麓最大，为1.6天/100 m；太行山地和晋西黄土高原为1.3天/100 m。无干热风的上限高度，太行山地和晋西黄土高原为1 200

m,河西走廊为1 800～1 900 m,新疆为1 200～1 400 m。海河湖泊岸边及附近地区,由于水体的调节作用,气温比内陆地区低且变化小,绝对湿度比内陆地区大,因此,干热风危害比内陆地区轻。山东、河北、江苏省沿海地区,干热风很轻,甚至消失。在距海岸一定范围内,年干热风日数和年过程次数由海岸向内陆逐渐增加,每增加1 km,年干热风日数增加0.02～0.06天。沙漠戈壁地区干旱少雨,地表裸露,白天气温很高,相对湿度很低,因而干热风比其它地区重。盐碱地、沙地、旱地有加重干热风危害的作用。

年平均干热风日数是反映干热风强度和危害程度的基本指标,干热风日数愈多,表示干热风愈强,危害也愈重。我国北方有东、西两大片小麦干热风重区。东部干热风重区分布在太行山以东的冀、鲁、豫3省的衔接地带及汾渭谷地。这是由于有强烈的下沉增温和焚风效应,以及干旱、盐碱土壤等因素的综合影响,形成了东部重干热风区,其中以焦作、洛阳、郑州、邯郸、邢台、大名、南宫、德州一带为最重。临汾地处黄土高原的山间盆地,三面环山,朝南开口,由于下沉增温和焚风效应,也是干热风重区。西部干热风重区分布在吐鲁番盆地、塔里木盆地和安敦盆地。这里由于地处内陆沙漠戈壁盆地,雨水稀少,气候干燥;受变性暖高压和高压脊影响,沙漠戈壁下垫面强烈辐射增温,成为西部重干热风区。吐鲁番盆地海拔低于海平面,干热风日数为全国之冠。

(四)干热风的防御措施

我国劳动人民在长期生产实践中,积累和创造了防御干热风的经验和方法。这些经验和方法可归纳为"躲"、"抗"、"防"、"改"4个方面。我国科技工作者从20世纪70年代开始研究和探索农田防护林、桐粮间作、灌溉、选育和鉴定抗干热风品种、喷施化学药剂及改革种植制度等防御措施。

(1)营造农田防护林　农田营造防护林可以调节温、湿度,降低风速、减少蒸发蒸腾,是防御干热风危害的一项根本途径。据山

西省夏县、河津1978年对5个干热风天气过程的观测结果，与无林对照地相比，林网内气温平均降低1.4℃，相对湿度提高16%，风速减小33.4%，水面蒸发量减少24.5%。林网内高温持续时间平均缩短2.3 h，低湿缩短5 h。河北深县1980年6月12～13日发生干热风时，林网内小麦受危害的时间为3 h，而无林对照麦田受危害的时间长达9 h。干热风侵袭后，无林对照地小麦受害青枯，林网内除林网胁地的小麦受害外，其他地段的小麦无明显受害症状。林网内植株伤流量比无林对照地高2.4倍，绿叶数多1～2片，光合强度高40%左右，叶片含水率高45%，蒸腾强度降低10%～50%，灌浆速度增加0.26 g，灌浆期延长3～5天，穗数增加6%，穗粒数增加7%。

(2)实行桐、麦间作　泡桐是林粮间作的理想树种，它生长快、耐旱、耐盐碱，木材用途也广。由于桐麦间作有明显的防御干热风的效果，因此在干热风危害严重的地区，普遍实行桐麦间作。

与农田防护林一样，桐麦间作也有降低气温、增加空气湿度、削弱风速和减少蒸发的作用。据测定，与空旷麦田相比，桐麦间作麦田的最高温度平均降低1.3～2.6℃(最大可降低4.1℃)，相对湿度增加3%～11%，风速降低10%～50%，蒸发量平均减少25%左右。桐麦间作有效地改善了温、湿、风等气象条件，使干热风日数明显减少。

由于桐麦间作降低了温度，增加了空气相对湿度和土壤水分，使小麦蒸腾强度减小，根系吸水能力增大，因此小麦体内能较好地维持水分平衡，有效地减轻了干热风的危害。桐麦间作田小麦产量比空旷麦田高，千粒重增加0.8%～19.1%，单产增加2.1%～53.4%。据各地试验结果，桐麦间作田小麦比空旷麦田平均增产10%～20%，越是干热风严重的年份，增产越显著。

(3)选用抗干热风能力强的小麦品种　生产实践证明，不同小麦品种之间抗御干热风的能力有很大差异。因此，对小麦品种的

抗干热风性能进行鉴定，选用抗干热风性强的品种，是防御干热风危害的有效途径之一。

(4)适时合理灌溉　通过灌溉保持适宜的土壤水分，增加空气湿度，可以达到预防或减轻干热风的危害。

小麦成熟前7～10天，是干热风发生最频繁的时期，如能在干热风发生前2～3天对茎叶开始转黄的麦田浇灌麦黄水，则能大大减轻干热风的危害。

(5)改革耕作、栽培技术　河西走廊中东部是冬、春麦兼种区，冬麦生育期比春麦提早10～15天，受干热风危害的频率比春麦减少8%～15%；把春麦改种冬麦，利用冬麦早熟的特性，躲避干热风的危害，可增产12%～43%；春麦早播既能培育壮苗，提高植株的抗逆能力，又能提早成熟，躲避干热风的危害。

(6)采取化学防御措施　这种方法是采用化学药剂或化学制品对小麦进行处理，通过改变小麦体内的生化过程来抗御干热风。化学防御措施很多，大体可以分为2大类：一类是用氯化钙、复方阿斯匹林等化学药剂处理种子，促进小麦壮苗，增强小麦抗御干热风的能力；另一类是在小麦生育后期干热风来临之前，用石油助长剂、磷酸二氢钾、草木灰水、过磷酸钙、矮壮素等化学药剂喷洒叶面，改善小麦的生理机能，提高小麦对干热风的抗性。

二、热害

高温对作物生长发育所造成的危害，称“热害”。高温天气会给工农业生产和人民生活带来很大影响。1988年，我国江南大部分地区在副热带高压控制下，盛行下沉气流，热浪滚滚，7月份高温天气持续了20多天。闽、浙、赣、湘、鄂、豫、苏、沪、皖、川东、黔东、陕南、粤、桂等地的日最高气温普遍达35～39℃，淮河及长江中下游不少地区的气温高达39～40℃，有的地区甚至超过41℃。高温酷热使处于乳熟期的早稻逼熟，千粒重降低而导致减产；棉花

因蒸腾作用加大,水分供需失调,发生萎蔫和落蕾落铃现象。高温酷热使城镇居民用水、用电量大增。例如上海1988年在高温期间日供水量突破历史最高水平,其中7月18日出水465万t,不少供水设备因超负荷运行而发生故障。再如北京1987年7月出现持续高温天气,日供水量增加15~20万t。持续高温使人们感到闷热难耐,疾病人数增多。南京、上海、南昌等地1988年夏因中暑住院的病人有2 000余人,其中近300人死亡。高温使劳动生产率普遍下降。

(一)几种主要作物的热害

1.水稻的热害

在长江中下游地区,双季早稻一般于6月下到7月初抽穗开花,7月灌浆成熟,中稻于7月下旬到8月上旬抽穗开花。华南地区的早稻开花灌浆一般在6~7月份。而这个时期正值副热带高压控制,高温、伏旱对水稻开花、灌浆极为不利。高温对水稻开花造成的伤害,主要是破坏了受精过程,而形成空粒。据中国科学院上海植物生理研究所在人工气候室试验,籼稻开花期在相对湿度为70%的条件下,30℃高温处理5天对开花结实已有明显伤害,38℃高温处理5天则全部不能结实(表5-9)。开花期35℃高温处理6 h的空粒率比28℃处理增加13.2%~22.9%。故认为籼稻开花期高温伤害的临界温度为日平均温度30℃,短期高温伤害的临界温度为35℃。四川省高温研究协作组(1918~1983)在人工气候箱对正在开花的汕优2号进行不同温度不同持续时间的处理,结果表明,以35℃高温处理4 h,其结实率发生明显异常,此种影响随着温度升高和持续时间延长而急剧增大。在自然温度条件下进行定穗观察,在日平均温度25.2~27.2℃,日最高温度27.4~31.3℃时,开花的不实率为9.87%~14.87%;在日平均温度29.0~30.9℃,日最高温度34.6~35.2℃时,开花的不实率上升到18.23%~21.93%。这个结果表明,在自然温度条件下,水稻

开花期同样会受高温的伤害。

表 5-9　早稻开花期不同温度对结实的影响

处理温度(℃)	实粒率(%)	秕粒率(%)	空粒率(%)
28	80.9	1.0	18.1
30	52.2	2.3	45.5
32	32.6	2.3	65.1
35	18.9	4.3	76.8
38	0	11.5	88.5

高温对水稻灌浆的影响主要表现为秕粒率增加,实粒率降低,千粒重减小。据中国科学院上海植物生理研究所研究,水稻在灌浆期经35℃高温处理(5天、10天、15天),各组空粒率无甚差异,但实粒率明显下降,半实粒率和秕粒率明显增加,且处理时间越长,伤害越重。在相同天数的处理中,35℃高温处理的各组,实粒率明显降低,且乳熟前期(抽穗后6～10天)所受的伤害比乳熟后期(抽穗后11～15天)和蜡熟黄熟期大,表明乳熟前期的高温伤害主要是降低实粒增加秕粒;32℃高温处理,可使千粒重降低0.5 g左右,乳熟后期所受的伤害大于乳熟前期,表明乳熟后期的高温伤害主要是降低千粒重。因此可以认为,在水稻灌浆—成熟期,32℃高温是千粒重的伤害温度;35℃高温可引起籽粒早衰,缩短籽粒灌浆持续期,是实粒率的伤害温度。

在农业气象工作中,通常以日最高气温大于和等于35℃作为早稻开花结实期高温伤害的临界温度。表5-10是长江流域及其以南稻区在早稻开花—成熟期日最高气温大于和等于35℃的出现天数。

从表5-10可以看出,6月份受高温伤害的概率较小,各旬平均一般小于1天,而7月份和8月上旬,各旬平均一般都在2天以上,有些地区可达3～4天以上,衢州、韶关、建阳等丘陵山区在4

~5天以上。沿海的上海、广州及成都，各旬平均一般小于2~3天。可见，丘陵山区早稻受高温伤害比沿海和盆地重。

表5-10 各地日最高气温大于和等于35℃的日数(1951~1980年)

地名＼月、旬	6月			7月			8月
	上	中	下	上	中	下	上
上海	0.1	0.2	0.5	1.7	1.7	1.5	1.3
杭州	0.2	0.5	1.0	3.1	3.8	4.7	3.5
衢州	0.0	0.5	0.9	3.3	4.3	5.8	4.6
芜湖	0.1	0.2	0.5	1.9	3.0	4.1	3.6
九江	0.1	0.3	0.8	2.7	3.6	5.2	4.3
武汉	0.2	0.4	0.8	2.3	2.9	4.6	4.1
常德	0.3	0.6	0.9	3.2	3.6	4.6	3.4
长沙	0.1	0.5	1.2	3.6	4.1	6.1	5.1
广州	0.4	0.1	0.2	0.5	0.5	1.1	0.4
韶关	0.6	1.0	1.6	3.4	4.8	5.2	4.4
柳州	0.2	0.6	1.2	2.3	2.5	3.7	2.7
建阳	0.2	0.8	1.5	4.0	5.2	5.7	4.3
成都	0.1	0.2	0.6	1.8	2.1	5.1	4.6

2.小麦的热害

许多研究认为，小麦籽粒中的干物质大部分是在开花后积累的，只有很少一部分是从茎秆中转运过来的。因此，小麦籽粒的灌浆速度和千粒重的高低与小麦灌浆—成熟期的气象条件有密切的关系。

小麦灌浆的适宜温度为20~22℃，高温22℃就不利于小麦灌浆，超过28℃就停止灌浆。小麦在灌浆期遇到27℃以上的高温，就会引起植株蒸腾强度增大，水分入不敷出，光合强度下降和生理机能早衰，提前结束灌浆，造成高温逼熟，粒重减轻的现象。如果

小麦遭受湿害，根系发生早衰，吸水、吸肥能力减弱，高温逼熟会更加严重。

在我国，小麦高温逼熟常发生于南方冬麦区和黄淮海平原冬麦区。据报道，影响小麦灌浆的主要因素是日温，白昼温度从25℃升高到31℃，粒重减轻16%。在南方冬麦区，小麦灌浆期如连续出现2天或2天以上27℃以上的高温；3～4级以上的偏南或西南风；下午相对湿度在40%以下时，小麦叶片即出现萎蔫或卷曲，植株变成灰绿或灰白色，小麦灌浆受阻，千粒重下降。在黄淮海平原冬麦区，小麦灌浆—成熟期的平均气温并不太高，一般年份处在适宜温范围内，但白昼温度却往往超过适宜温度范围，灌浆后期的日最高温均在30℃以上，致使小麦抽穗—成熟期只有35天左右，千粒重约30～40 g。

3.玉米的热害

全生育期平均气温28℃以上将造成玉米的高温热害。若以全生育期平均气温29℃为轻度热害的标准，则将减产11.9%；若以33℃为中度热害的标准，将减产52.9%；严重热害(36℃)，将造成极严重危害。

玉米不同生育阶段的耐热性有明显的差别，总的趋势是苗期最耐热，生殖期次之，成熟期最不耐热。以中度热害来说，苗期的热害指标为36℃，玉米苗期在35℃条件下生长，其植株高度和干物重都会受到明显影响；生殖期的热害指标为32℃，当气温高于32℃时，不利于玉米开花授粉；成熟期的热害指标为28℃。成熟期气温高于25℃，如同时出现干旱时，将会因高温逼熟而减产。

根据M. Tollenaar等试验，玉米在营养生长阶段31℃时出叶最快，为0.6叶/天；33℃时受高温轻度危害，出叶速率降低7.1%；36℃时受中度危害，出叶速率降低14.3%；39℃时受重害，出叶速率降低40.0%。

我国的玉米热害主要发生在四川、广西、河南、山东等省。这

些省(区)地处中低纬度夏秋高温地区,在玉米扬花期最高温度超过35℃和成熟期日平均温度超过25℃,造成不育少粒和粒重减轻。

(二)热害的防御措施

(1)选择耐高温和早熟品种,避开高温危害　不同水稻品种开花期抗高温的能力不同。因此,可以选用抗高温能力较强的品种同早熟高产品种合理搭配,利用抗高温能力较强的品种来减轻高温危害,在高温到来之前渡过开花和乳熟前期,以取得大面积平衡增产。四川省东南部地区在7月下旬到8月上旬常发生高温伏旱天气,近年来采用比较耐高温的杂交组合如汕优2号,采用以早播为中心,温室两段育秧为手段的一套避灾稳产高产栽培技术,将齐穗期提早到7月20日前,基本避开了高温伏旱的危害,使杂交稻在这个地区获得较高的产量。在黄淮海地区,选用早熟高产的冬小麦品种,提前成熟2～3天,即可减轻成熟期的高温危害。

(2)播前种子处理　据国内外研究,经过气候驯化和锻炼的植物,其忍耐极端温度的能力加强,受害和致死温度将发生变化。有人将植物进行高温处理后,其光合上限温度提高3～4℃,即抗热害能力提高1级。

(3)调整播栽期　调整播栽期,把水稻易受高温伤害的敏感阶段推迟,避开高温季节。如有些地区实行中稻晚栽,把抽穗扬花期推迟到8月底、9月初,避开7月份的高温,可以提高结实率。再如广西把春玉米的播种期从2月中旬提前到1月下旬,播后覆盖塑料地膜,以防苗期低温冷害和霜冻,至3月中、下旬即可进入正常的适温生长。这样,春玉米在5月下旬日平均气温升到25℃以前即可成熟,避免了5月下旬的高温危害。在我国西南地区采用玉米育苗移栽,把播种期提前1个月,也可以避免生育后期的高温热害。

(4)加强田间水肥管理　通过施肥量的调节,控制水稻群体,

改善孕穗期和始穗期株间通风透光条件和提高光合能力等，均能减轻高温伤害，提高结实率。水稻扬花后要浅水勤灌、日灌夜排、适时落干，防止断水过早，这样可以改善稻田小气候，促进根系健壮，增强抗高温的能力。在南方冬麦区，搞好麦田开沟排水工作，防止湿害，可以减轻小麦生育后期的高温危害。在小麦抽穗灌浆阶段，特别是遇上高温低湿天气，应根外喷施氮、磷肥料，起到养根护叶的作用，以防御小麦高温逼熟。

(5)在高温来临时进行喷灌　高温来临时进行喷灌，能明显降温增湿，而且气温越高，喷灌的降温增湿效果越好。据试验，喷灌后田间气温可迅速下降 2～5℃，相对湿度增加 10%～20%，有效时间约 2 h 左右。喷灌可以降低空秕率约 2%～6%。此外，在高温出现时喷洒 3%的过磷酸钙，也有减轻高温伤害的效果。

第六节　其他农业气象灾害

一、大风

(一)大风的种类及其成因

我国不同地区、不同季节遭受危害性最大的大风，按其形成原因，可分为寒潮大风、雷暴大风、台风(热带气旋)和龙卷风等。

1. 寒潮大风

寒潮是指大规模的强冷空气像潮水一样迅猛地向南奔流。我国中央气象台规定：凡一次冷空气南侵使长江中下游及其以北地区 48 h 内降温 10℃以上，长江中下游最低气温降至 4℃或以下(春、秋季则为江淮地区的最低气温降至 4℃或以下)，陆地上有相当 3 个大行政区出现 5～7 级大风，沿海有 3 个海区出现 7 级以上大风的，作为发布寒潮警报的标准。如果 48 h 内最低气温下降 14℃以上，陆地上 3～4 个行政大区有 5～7 级大风，沿海所有海区

出现7级以上大风的，作为发布强寒潮警报的标准。

(1)寒潮的形成及其入侵我国的路径　在北极地区，太阳高度角极小，地面和大气吸收的热量也极小，温度很低，终年为冰雪所覆盖。尤其是在冬半年，这些地区白天短，黑夜长，地面得到太阳辐射能量更少，而放出的能量远远超过所吸收的能量，因而使寒冷的程度逐渐加强，范围逐渐扩大。这里冬季的温度一般在-40～-50℃之间，有些地方甚至还出现过-60～-70℃的低温。这些大范围的冷气团聚集到一定程度，在有利的大气环流引导下，便大规模地向南倾泻而下。这就是寒潮暴发。影响我国的寒潮主要有3个源地：①新地岛以西的寒冷洋面；②新地岛以东的寒冷洋面；③冰岛以南的洋面。

虽然我国在9月至次年5月都可能遭受寒潮的侵袭，但主要发生在11月至次年4月。据统计，平均每年有5次寒潮影响我国。但年际之间变化较大，多的达10次(1968～1969年度)，少的仅有1次(1974～1975年度)。出现时间，秋季仅占2%，冬季占67%，春季占31%。由于寒潮源地不同，加之受地势的影响，每次入侵寒潮的路径并不都是相同的，但也不是杂乱无章的。据统计分析结果表明，寒潮入侵我国有3条路径：①中路。寒潮从新地岛附近的北冰洋出发，经西伯利亚西部，进入我国新疆北部或蒙古人民共和国后，向东南方向，扫过黄河河套地区泻入华北平原，直达长江中下游地区。有时穿过南岭，影响华南沿海。②东路。寒潮从亚洲北部的北冰洋出发，经俄罗斯的东西伯利亚和蒙古人民共和国径直南下，经我国东北或日本，进入东南沿海一带。③西路。寒潮从欧洲北部的北冰洋上出发，穿越整个欧洲大陆，南下到地中海附近，然后拐弯向东，经过新疆、甘肃、青海等地进入长江流域。

(2)寒潮天气特征　由于寒潮是大规模的强冷空气活动，因此受到寒潮侵袭的地区，天气都会发生剧烈的变化。当冷空气南下时，南方的暖湿空气被迅速抬升，并变冷产生水汽凝结，形成浓密

的云层和雨雪。当寒潮到来时，风向会发生突变，偏北风逐渐增大，6级以上的大风持续1天左右，以后风力逐渐变小，云层逐渐消散。在微风的晴夜里，地面辐射冷却强烈，温度急剧下降，会出现霜冻现象。寒潮过后，逐渐刮起偏南风，气温回升，有时连续几天出现反常的回暖天气，这往往是另一次冷空气或寒潮的预兆。

2.雷暴大风(飑线)

雷暴大风天气是强雷暴云的产物。强雷暴云体的前部是上升气流，后部是下沉气流。由于后部下降的雨、雹的强烈蒸发，使下沉的气流变得比周围空气冷。这种急速下沉的冷空气在云底形成一个冷空气堆，地面气压场上出现一个很小的局部高压，称为雷暴高压，使气流迅速向四周散开。因此，当强雷暴云来临的瞬间，风向突变，风力猛增，往往由静风突然狂风大作，并伴有雷声和闪电，暴雨、雹冰俱下。雷暴大风突发性强，持续短(一般6～9 h)，一般风力达8～12级，所以它有很大的破坏力。当强雷暴云中伴有大冰雹和龙卷风时，其破坏性更大。

(1)我国飑线的地理分布　飑线多发生在长江流域以北地区，其中内蒙古、河北、山西、山东、河南、江苏和沿海等地每年均有发生。若低压中心在内蒙古，我国东北和华北在低槽的前部，槽前产生的飑线多见于内蒙古、河北和山东一带，尤其以盛夏出现较多。若低压中心在东北地区，低压向南伸至河南南部，整个中国大陆为暖低压所控制时，飑线往往产生在这个低压槽内，河南、山西一带容易出现飑线天气，春末夏初尤为多见。若低压中心在四川一带，低压槽向北伸至黄河河套地区，向东伸到长江口一带，东北方又有冷空气侵入时，容易造成淮河以南的江苏、浙江、江西一带飑线天气的发生，尤其多见于春季。

(2)飑线形成的天气特点及其危害　飑线的形成是起伏不平的地形和分布不均的热力所产生的动力作用和热力作用发生综合作用的结果。它的形成和发展与大的天气形势有着密切的关系，

同时地方性条件也起着极其重要的作用。飑线主要发生在积雨云最容易形成的炎热季节里，飑线发生之前多属晴好天气，气温较高，风力微弱，风向很乱或多偏南风，空气湿度较大，天气闷热，具备雷雨条件。飑线多发生在下午 6:00 至晚上 12:00。在飑线发展到全盛阶段，平均风速在 10 级以上，阵风超过 12 级，可拔树倒屋。另外，与其伴随的强大阵雨和冰雹，对农田作物也会造成很大危害。

3. 台风(热带气旋)

热带气旋是发生在热带或副热带海洋上的气旋性涡旋，在北半球做逆时针方向旋转，在南半球做顺时针方向旋转。它主要是依靠水汽凝结时放出的潜热而发展起来的，其强度以中心附近的最大平均风速来确定。按世界气象组织规定，国际热带气旋名称和等级标准为：①热带低压。其中心附近最大平均风力为 6～7 级，即风速为 10.8～17.1 m/s。②热带风暴。其中心附近最大平均风力为 8～9 级，即风速为 17.2～24.4 m/s。③强热带风暴。其中心附近最大平均风力为 10 至 11 级，即风速为 24.5～32.6 m/s。④台风。其中心附近最大平均风力为 12 级以上，即风速为 32.6 m/s 以上。可见台风是热带气旋中强度等级最高的一种。我国从 1989 年已采用这一强度等级名称。为了便于分析和预报，我国每年对在经度 180°以西、赤道以北的西北太平洋和南海海面上出现的、中心附近最大平均风力达到 8 级或以上的热带气旋，按照出现的先后次序进行编号。编号用 4 位数码，前 2 位数码表示年份，后 2 位数码表示出现的先后次序。

(1)台风的源地及其移动路径　影响我国的台风生成于西北太平洋和南海。西北太平洋台风主要在 5°～25°N 之间的地区生成，其中以 10°～20°N 之间最多。南海台风主要发生在 15°N 以北的南海北部海面，有 63% 发生于中沙、南沙群岛和菲律宾之间的海域。西北太平洋西行台风发生源地偏西、偏南，70% 发生在 10°

N以南的菲律宾至关岛之间的海面,台风源地集中在3个地区:马里亚纳群岛和马绍尔群岛之间的洋面、菲律宾以东洋面和我国南海洋面。

西北太平洋台风多数是从10°～20°N之间向偏西方向移动,在菲律宾吕宋岛东侧的洋面上分成3条主要路径影响我国:路径Ⅰ,台风由菲律宾以东一直向西行,经南海、广东、广西或越南登陆。对广东、广西天气影响较大。路径Ⅱ,台风由菲律宾以东向西北方向移动,在中国台湾、福建、浙江、上海等地登陆,登陆以后,有的在内陆消亡,有的再转向东北入东海或黄海,变为锋面气旋。这类台风对中国的天气影响最大。路径Ⅲ呈抛物线状,台风先向西北或北方移动,后转向东北。这类路径的台风为数最多。如在近海转向,也可影响中国东部沿海地区的天气。如在远海转向,则对中国的天气影响不大。台风移动速度平均约为每小时20～30 km。在停滞、打转时移速较慢,转向后移速常加快。

(2)台风在我国登陆的地点和季节　每年台风在我国登陆的最北地点平均出现在29.1°N附近,最北可达40.1°N,但主要集中在浙江省以南沿海。据统计,1951～1980年间,在我国登陆的台风有210个,平均每年7个。1971年最多,有12个;1951年最少,仅3个。在30年中登陆最早的台风是1971年5月3日,在海南省乐东到崖县登陆的2号台风。最晚的是1974年12月2日,在广东台山登陆的27号台风。30年中,在浙江及其以北登陆的台风总数只有20个,不到登陆台风总数的1/10,其中浙江12个,山东5个,其余3个分别在上海、江苏、辽宁登陆;而90%以上的台风均在浙江以南的沿海、台湾、海南省登陆,其中登陆台湾省的有52个,占登陆台风总数的25%,是中国沿海台风登陆最多的地方。

登陆我国的台风,从多年情况看,5～12月均有台风登陆,但多集中在7,8,9三个月,占全年总数的77%,其余各月占23%;第Ⅱ类西行台风活动在5～11月,高峰期8～9月;第Ⅲ类西行台风

活动在 6～11 月，高峰期为 8 月。热带气旋的巨大破坏力主要是由 3 方面造成的：①狂风巨浪；②风暴潮；③暴雨。

由于热带气旋的能量很大，来势凶猛异常，造成灾害是不可避免的。但是，及时准确的预报，并采取积极有效的预防措施可以大大减少人员伤亡和经济损失。

(二)大风对农业的危害

从实际情况来看，5 级以上的大风就会对作物造成危害。大风对农业生产的危害主要是对作物的机械损伤、造成土壤风蚀沙化和生理危害，同时也影响农事活动和破坏农业生产设施。

(1)机械损伤　大风对作物的机械损伤，或为枝叶之间相互擦撞而受伤，花果脱落；或为枝干折断；或者倒伏。受害程度视风力大小、作物的抗风能力和发育期等而定。一般在开花期或成熟期，受害最重。谷类作物在抽穗前剑叶被大风折断，则抽穗困难；开花期遇大风，影响开花结实，此时如果植株倒伏，则减产严重。如水稻在抽穗前后 3～5 天遭台风危害，对产量影响最大。小麦、谷子在灌浆至蜡熟期遇 5 级大风常造成倒伏或落粒。玉米在抽穗时，支持根尚未长出之前，5 级大风也常造成倒伏或折断。果树在开花时遇到 5 级以上的大风，花瓣常被吹落；在成熟期，7 级大风可造成严重落果或断枝。蓖麻遇 5 级以上大风，亦常会折断倒伏。海南岛的台风是橡胶树的主要灾害，10 级以上台风可使橡胶枝普遍发生折枝、断干或倒伏。文昌、琼山等地的橡胶园缺株率高达 26.2%，其中约 1/4 毁于台风。据测定，当风速为 13～16 m/s 时，能使森林树冠表面受到 15～20 kg/m^2 的压力，浅根树能被连根拔起。

(2)风蚀　干燥而土质疏松的土壤，遇到大风时，表土被刮走，称为“风蚀”。根据一些研究结果，表层土壤湿度只有 4% 左右的干燥土壤，3～4 m/s 的风就能将表土刮起来；土壤湿度为 16% 左右时，5～6 m/s 以上的风也能刮起表土。风速越大，耕地被风蚀

得越严重，以致使播下的种子暴露地表，或连同表土一起被刮走。携带大量泥沙的风遇到障碍时，因风速减弱，携带力减小，沙粒便沉降堆积，往往埋没作物的幼苗。农田受到严重风蚀后，便变成荒芜。我国北方的一些地区，春季遭受风沙的危害往往是很大的。华南滨海地区，也有断续分布的沙漠，而且向海和向内陆蔓延，大风就是它的成因之一。例如，内蒙古乌兰察布盟后山地区开垦的农田，已有43%被风蚀沙荒化，风蚀深度一般在40 cm左右。近20多年来，海拉尔周围开垦的土地，黑土层平均已被吹蚀20～25 cm。由于风蚀，使非洲撒哈拉沙漠周围10多个国家丧失了大量农田和牧场。

(3)生理危害　干燥的大风能加强植物蒸腾，造成叶片气孔关闭，光合强度降低，致使林木枯顶，作物萎蔫，甚至枯死。例如，1975年12月21日，强劲的寒潮大风，使昆明最低温度降至－2℃，郁郁葱葱的艮桦树几天之内就全部落叶，使昆明的自然景观一改四季如春的景象；第二年春天，10多m以上的树冠全部枯死。在我国北方，春、夏季大风还可以加剧土壤蒸发失墒，导致农作物的旱害。冬季大风可加剧越冬作物的冻害。在东南沿海的海潮风，含有较高盐分，可渗透到植物组织中，使植物受害。在大风时，植物的同化作用减弱，据对一些植物的试验证明，同化生长的数量，风速为5 m/s时，仅为无风时的1/2；风速10 m/s时，仅为无风时的1/3，叶片越大越薄，所受影响越大。

(4)引起旱涝灾害　长期大风加剧干旱，台风引起洪涝灾害。

(5)影响农牧业生产活动　大风可破坏农牧业生产设施，破坏交通运输，影响农牧业生产，在牧区则影响畜群采食，甚至被吹散丢失。例如，1973年1月，西藏浪卡子刮11级大风，阿扎多700多只羊被刮进湖里淹死。

(三)大风的防御措施

虽然人们对灾害性大风还无法控制，但实践结果证明，针对大

风的危害采取各种防御措施,可以避免或减轻大风的危害。

1.营造防风林,减轻风害

植树造林,特别是营造防风林带、防风林网,是减轻风害的根本措施。

我国华南沿海地区,防护林网对减轻台风危害有显著作用。在台风侵袭过程中,农田林带对降低风速和减轻风害程度十分显著。位于珠江口台风登陆首当其冲的白藤湖围垦区,1978 年建立起防护林后,林网内平均风速降低 20%~40%,离树高 5 倍范围内降低 50%~60%,10 倍范围内降低 30%~40%,15 倍范围内降低 25%~30%,20 倍范围内降低 15%~20%。有林网保护的稻田每 $667m^2$(1 亩)平均减少损失 16.5 kg,新植蔗田基本无倒伏。

2.扩大绿地面积,削弱风沙危害

为了防止半干旱地区风蚀沙化,应天然封育一些地区,特别是农牧交错带实行天然封育,土地生产能力可以逐渐恢复。在干旱草原或荒漠草原地带,除了保护天然植被,封沙育草,栽植固沙植物外,还应营造综合防护体系,即防沙林、护田林网、人工草地、保护天然植被以及居民点建设等多种措施相结合的绿化带。

3.防风的农业措施

(1)选择抗风和矮秆品种　选择抗风的和秆矮的品种,可以减轻风害。如矮秆的水稻、小麦、玉米品种,能抗风、抗倒伏,已在生产上起了很大的作用。橡胶树矮化整形,也是减轻风害的措施之一。对于高秆作物如甘蔗、玉米等,及时进行培土,抗风能力也能提高。

(2)设置风障　对小面积的经济价值高的农田,如塑料大棚温室、苗圃地等,可选择适宜的地形,设置风障来防风害。

(3)调整农业结构　因地制定地调整农、林、牧结构,即商品性的畜牧业,保护性的林业和自给性的农业相结合的结构。在干旱半干旱地区,应实行轮牧养草,制止乱垦乱牧,保护自然植被,是防

止风蚀的有效措施。

(4)及时抢牧抢管 对于已经接近成熟的作物、水果,在台风侵袭前,应及时抢收抢摘。对于正在生长的高秆作物,可分为3~5株为1组,用细草绳扎起来,以防吹倒;棚架作物,要加固棚架,以防倒塌。台风侵袭后,对农田要及时管理,清除冲到田里的柴草、垃圾,冲洗沾在作物茎叶上的泥土。适当增施速效肥料,使作物尽快恢复正常生长。

4.加强对大风的监测和预报

准确地预报是防风的前提。由于科学技术的不断发展,目前气象部门已能较准确地监测和预报热带气旋(台风)和寒潮大风等天气。随着雷达的出现,为我们及时发现龙卷风、雷暴大风等提供了有效的手段。这样,人们就可以在大风发生之前,采取各种防风措施,如将船只驶入港口避风,抢收已成熟的作物,赶回放牧的牲畜等,从而有效地避免或减轻大风危害。

二、冰雹

(一)冰雹的形成

一般来说,发展强盛的积雨云都有一个厚实的云层,气象上叫做深厚的层结不稳定。云中的上升气流比较强,上升气流的速度一般在20 m/s以上。这种上升气流是不均匀的,时强时弱。它把云底部不断增长的水滴送到0℃层以上,成为过冷却水滴。这些过冷却水滴与冰晶、雪花混合在一起,彼此相互碰撞,形成许多小冰雹微粒。这些小冰雹微粒随着时强时弱变化的上升气流,在0℃层上下反复升降,在"融化—结冻—再融化—再结冻"的反复过程中,不断增大。当雹粒增大到上升气流托不住它时,便降落到地面,成为人们所说的冰雹(图5-13)。

(二)冰雹的时空分布特征

1.冰雹的地区分布特征

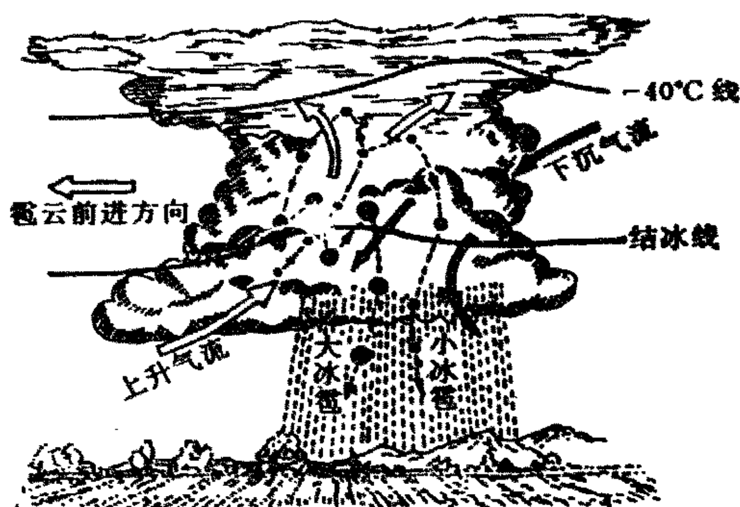


图 5-13 冰雹的形成示意图

我国的多雹区主要分布在高原和山区，并按高原和高山的走向呈带状分布。平原、盆地和沙漠地区则冰雹较少，呈现出高原、山地多于平原、盆地；内陆多于沿海；北方多于南方的地理分布特征。

调查资料表明，从海拔 200～300 m 开始，海拔高度升高 1 000 m，年雹日增加 1～2 天；海拔升高 2 000～3 000 m，年雹日增加 4～5 天；升高 3 000～4 000 m 增加 7 天；升高 4 000～5 000 m 增加 10 天。青藏高原降雹最多的高度在 4 500 m 附近。在青藏高原的主体部分，年雹日都在 10～20 天以上，最多年份可达 20～30 天以上。在那曲、班戈、索县、清水河一带，全年雹日数在 25 天以上，最多年份可达 30～40 天以上，如那曲年平均雹日数为 34.5 天，最多年达 53 天，成为全国之冠。四川的理塘、松潘以西大部分地区，年雹日在 8 天以上；唐古拉山周围地区在 20 天以上；西藏的黑河为 35 天，大雪山西侧为 12～13 天。从青藏高原东北部，斜向东北，经祁连山、六盘山，越过黄土高原和阴山山地，到达内蒙古高原东部的大兴安岭，并经河北北部直抵东北全境，是我国最宽、最长的多雹地带，其中祁连山山地年雹日在 10～15 天以上，最多年在

15～20 天以上。内蒙古高原南部年雹日在 4～5 天以上，最多年在 10～20 天以上。华北、东北山地、内蒙古东部为 3 天左右。黄土高原和东北平原为 1～2 天。在这条多雹带内，六盘山、五台山、阴山、兴安岭等山地是多雹中心，农牧业受冰雹危害最严重的地区有黄土高原东北部、内蒙古高原南部和一些山脉东南侧的山前地带。在青藏高原以东，自横断山脉经云贵高原延伸至湘西、鄂西山地，也是一个多雹区，其中川西的乾宁、理塘年雹日达 15 天以上；云贵高原、湘西山地及以南地区，年雹日为 1～3 天。从云贵高原向东到湘西、川、鄂边界一带，在海拔为 1 000～2 000 m 的地区受冰雹的危害较重。

新疆的冰雹也较多，如阿尔泰山的年雹日为 1～3 天，天山达 10 天，中山地带的昭苏高达 23.1 天。此外，还有一些围绕某些山脉的孤立的多雹区，如泰岭、大巴山、长白山、沂蒙山和武夷山等山区，年雹日为 1～2 天，多的也可达 10 天。

冰雹的生成和移动与地形有密切关系。一般来说，有利于冰雹发生的地形有山脉的阳坡和迎风坡、山麓和平原的交界地带、地形较复杂的山谷地带、山间盆地和马蹄形地区，如西辽河上游、云南的鹤庆县、青海的民和县、河北的涞源县、山东的沂蒙山区、贵州的湄潭县、甘肃的平凉县和华亭县、北京的延庆县等，都是有名的多雹地区。

2. 冰雹的时间分布特征

据冯佩芝等对 1951～1980 年间的资料统计，我国的初雹日（即最早出现冰雹的日期）有从南向北依次推迟的趋势。贵州、湖南、云南、广西、江西、湖北等省（区）大部及安徽、广东、四川、河南等省的部分地区，初雹日一般出现在 1～2 月份。南方沿海、四川大部地区，大致在 2～3 月份，华西、华北和东北大部出现在 4 月份。青藏高原西部和大兴安岭北部的初雹日在 5 月份。终雹日期（即最晚出现冰雹的日期）则是北方早，南方迟，盆地和平原地区结

束也较早。塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地及黑龙江、内蒙古和宁夏的北部及淮河流域大部分地区终雹日最早,8～9月以后,就不再出现冰雹。东北平原大部、华北大部、西北东部及青藏高原大部分地区,终雹日出现在10月。西南大部、华南大部、长江中下游大部及山东、辽宁两省大部,终雹日最晚,11～12月份仍有冰雹。

我国东部地区降雹的集中季节,有自南向北推迟的趋势。西南、华南和江南集中在2～3月;长江流域、淮河流域和四川盆地集中在4～5月份;西北、华北和东北集中在6～9月,内蒙古高原集中在7～8月。西部地区受海拔和地形的影响,情形比较复杂。西藏东南部至滇西北,降雹集中于4月,35°～36°N的昆仑山区集中于7月,祁连山区从春至夏,多雹带从海拔较低的地区逐渐向高海拔山区推移,7～8月份,多雹带位于4 000 m的山地。

我国大部分地区是在午后至傍晚降雹,以14:00～16:00降雹最多。根据山西省15个气象站统计,12:00～19:00时的降雹次数占总降雹次数的65%。川西高原13:00～20:00的降雹次数占90%左右。青藏高原的班戈、那曲、丁青等地14:00～18:00的降雹次数占70%左右。贵州在14:00～20:00的降雹概率占全天的70.3%。但在四川盆地往东至湘西、鄂西南,因受青藏高原的影响,夜间降雹比白天多。四川盆地东南部和贵州东部的部分地区,有56%的冰雹出现在20:00～6:00。

(三)冰雹的危害

我国每次降雹,持续时间都很短,一般在几分钟到半个小时。降雹多呈带状,其宽度一般只有1～2公里,长度从几千米至几十千米,故有“雹打一条线”的说法。但由于来势凶猛,并伴有大风、暴雨,常给农牧业生产造成巨大危害。

冰雹砸在作物的茎、叶及穗上,会造成严重的机械损伤,尤其对丰收在望的农作物带来严重损失,局部地段甚至颗粒无收。多

年生的果树受到冰雹砸击，不仅会造成枝叶断折、果实脱落，当年损失惨重，还会影响第二年的生长和结果。

（四）冰雹的防御措施

我国劳动人民在长期生产实践中，积累了丰富的防御冰雹危害的措施，主要包括防雹与抗雹两个方面。目前人们根据雹粒形成的基本条件，提出预防冰雹的两种设想；一是让过冷却水滴尽快降落，以断绝雹粒增长的原料；二是促使过冷却水滴尽快冻结成冰粒，增加雹粒个数，减小其体积，以减轻其危害。根据这些设想，目前国内外在人工防雹中主要采用两种方法。一种是利用催化剂防雹法。它是利用火箭、飞机或雹弹将碘化银微粒撒入云中，促使云中的过冷却水滴变成冰晶。由于碘化银的微粒很多，使冰晶个数大量增加，从而使过冷却水滴减少，不易形成较大的冰雹。另一种方法是炮轰法。它是利用土炮、土火箭或空炸炮等在云中或云下爆炸，有的是用高射炮轰击。目前，我国有内蒙古、甘肃、新疆、四川、湖北等 10 多个省（区）开展了防雹，并取得了一定的效果。

在多雹区，调整农业结构，适当增加林、牧业的比重，在种植业内部合理扩大抗雹性强和再生力强的作物面积，如地下结实的花生、甘薯、马铃薯和茎秆矮而柔软、叶片细小的水稻、小麦、谷子等的种植面积，并调整播种期，把作物最易受害的生育期与当地降雹集中的时段错开。成熟的作物要及时抢收等，也能达到防雹的目的。

作物遭受雹灾后，应根据不同灾情、不同作物、不同生育期和季节早晚，采取有效的农业技术补救措施。一般来说，小麦、玉米、高粱、谷子等作物苗期遭受雹灾，只要抓紧及时追肥、浇水、中耕，加强田间管理，促其恢复生长，都能获得一定的收成。小麦在孕穗期遭受雹灾，比正常小麦晚熟约 15～20 天左右。玉米、谷子抽穗以后受雹灾，因恢复能力差，遭受危害较重，但对还能恢复生长，并可获得一定收成的，不要轻易翻种或改种其他作物，也不要剪除被砸烂的茎叶。灾后如缺苗严重，可补种早熟的绿豆、荞麦或小豆等

小日月作物，以弥补产量。甘薯“返苗”前遭雹灾的，应抓紧重新栽插或补种；返苗、团棵期以后遭灾的，只要还有茎蔓，经过及时松土增温并追肥后，还能恢复生长，其产量比灾后翻种的还要高。棉花现蕾期遭雹灾，只要 40%～50%的棉株还有果枝，可不必翻种，采取多中耕、多施肥、多留果枝、放长果枝等措施，仍可获得较好的产量。

三、白灾(雪害)

白灾是草原放牧业的一种冬季雪害。它主要是指依靠天然草场放牧的畜牧业地区，冬半年由于降雪过多和积雪过厚，雪层维持时间长，积雪掩埋牧场，影响家畜放牧采食或不能采食，故造成饿冻或因而染病，甚至发生大量死亡。积雪还防碍交通，压损棚圈等。我国历史上因发生白灾而造成牲畜大量死亡的事例很多。例如唐贞观元年(公元 627 年)“突厥国大雪，平地数尺，羊马皆死，人大饥”；1966 年 2～4 月初，新疆北部连降大雪，阿勒泰县积雪深度达 73 cm，其它地区也在 30～50 cm 左右，阻断交通达半个月之久，牲畜冻死、饿死达 900 多万头(只)；1973 年 3 月日喀则西部降大雪，积雪普遍达 50 cm 深，仲巴县积雪深达 2 m，中断交通 2～3 个月，牧区草场全被大雪覆盖，造成历史上罕见的白灾，大部分牲畜因饿冻而死亡。又如 1977 年 10 月 26～30 日，内蒙古锡林郭勒盟和乌兰察布盟北部降特大暴雨，积雪厚度普遍达 17～34 cm，局部地区达 34～67 cm，造成大雪封路，交通断绝，草场变成茫茫雪海。雪后气温下降，比常年偏低 5～6℃，阿巴嘎旗 11 月最低气温达 -34.6℃，加上 11～12 月又连下几场小到中雪，致使积雪长期不化，牲畜饥寒交迫，造成特大的白灾，仅锡林郭勒就死亡各类家畜 300 多万头(只)。

(一)白灾的指标及分级

白灾的形成主要取决冬春降雪量和积雪掩埋牧场的程度。冯

佩芝等分析各地约 40 次不同强度的白灾和降雪量的关系，发现某一时期降雪量与常年同期降雪量的比值，一般能反映出白灾的危害程度。而积雪掩埋草场的程度，即积雪深度是形成白灾的重要标志。此外，草场被雪掩盖后，牲畜采食的难易程度不仅取决于积雪深度和雪的密度，而且还与各种牲畜破雪采食能力有关。据调查，马的采食能力最强，骆驼次之，绵羊较差，牛最差。马的破雪采食能力(以积雪深度表示)为 30 cm 左右，骆驼为 25 cm 左右，绵羊为 20 cm 左右。牛啃食低草的能力比羊、马差得多，其破雪采食能力低于 10 cm。而且，当白灾发生后，牛不如马耐寒，马还有善奔跑的能力，易转场放牧，所以马受白灾的危害比牛轻。例如，草甸草原水分条件较好，牧草生长茂盛，牧草高度在 30 cm 左右，积雪深度不足 15 cm 时，一般不会成灾；积雪深度为 15～20 cm 时，影响牛放牧采食，而对马放牧采食无影响，而形成轻白灾。在荒漠、半荒漠草原，牧草高度多在 20 cm 以下，当积雪深度为 5～10 cm 时，雪掩埋牧草平均高度的 1/3～1/4，可形成轻白灾，此时牛采食困难，羊稍受影响，而对马则无大影响；积雪深度超过 15 cm，各类家畜放牧采食都发生困难而形成重白灾。青藏高原的草甸草原，牧草矮小，积雪深度超过 3 cm 时，牛采食就感困难，而对马放牧采食无影响，形成轻白灾；当积雪超过 10 cm 时，各类家畜采食均受影响，为重白灾。

由上述可知，白灾的形成与冬春季降雪量、积雪深度和维持时间、积雪密度、草层高度和家畜种类有密切关系。中国牧区畜牧气候区划科研协作组以草场类型、积雪深度和牧草被雪掩埋程度为主导指标，以冬春降雪量占历史同期降雪量的百分数为辅助指标，并结合各种家畜的受害情况，把白灾分为 4 级(表 5－11)。

(二)白灾的时空分布

据牧区的调查资料分析，我国牧区从 10 月份到第二年的 5 月份 均有可能发生白灾，但发生白灾的高峰期在11月份和3～4月

表 5－11　白灾分级及指标

白灾指标 / 白灾分级	主导指标			辅助指标	家畜受害情况
	草场类型	积雪深度(cm)	积雪掩埋牧草平均高度的百分数(%)	冬春降雪量占历史同期降雪量的百分数(%)	
无白灾	高寒草甸草场	<3	<30	<120	没有稳定积雪,对各类家畜放牧均无影响
	草甸草场	<15	<30		
	草原草场	<10	<30		
	荒漠、半荒漠草场	<5	<30		
轻白灾	高寒草甸草场	3～5	30～40	>120	影响牛放牧采食,对羊的影响尚小,对马放牧采食无影响
	草甸草场	15～20	30～50		
	草原草场	10～15	30～50		
	荒漠、半荒漠草场	5～10	30～40		
中白灾	高寒草甸草场	6～10	40～65	>140	主要影响牛、羊放牧采食,对马放牧采食影响尚小
	草甸草场	20～25	50～65		
	草原草场	15～20	50～65		
	荒漠、半荒漠草场	10～15	40～65		
重白灾	高寒草甸草场	>10	>65	>160	各类家畜放牧采食均受影响,如防御不当将造成大批家畜死亡
	草甸草场	>25	>65		
	草原草场	>20	>65		
	荒漠、半荒漠草场	>15	>65		

份,分别占年总次数的50%和40%左右。因为11月份降雪量大,而且表层积雪还可日融夜冻,形成冰壳,牧畜不易破冰雪采食,造成“饿灾”。3～4月份牲畜膘情最差,抵抗力最弱,部分牧区又处于接羔保育期,而且又是冷空气活动频繁季节,一旦发生白灾,使牲畜尤其是老、弱、病畜死亡率显著增加,母畜流产增多,仔畜成活率降低,损失比其他时期都大。所以牧民说:“年前就怕十月雪,年

后就怕三月天。”

中国牧区畜牧气候区划协作组根据白灾的定义和成灾指标，分析了1961～1980年各地牧区发生白灾的次数和频率，结果表明，大兴安岭以西、阴山以北的内蒙古高原牧区白灾的发生概率为40%，是我国牧区白灾发生频率最高的地区；其次是祁连山牧区、北疆部分山区，白灾发生频率为35%；内蒙古阴山以南及巴颜淖尔盟一带、宁夏六盘山区、甘肃的陇中西北部、甘南高原、南疆部分山区、川西部分牧区，白灾发生频率在20%～25%以下。在降雪量少或温度高，不易形成稳定而深厚积雪的地区，和补饲条件好的半农半牧地区，一般不会发生白灾危害。

(三)白灾的防御措施

积雪对牧草越冬起保温作用；早春融雪可增加土壤水分，对春季牧草萌发和返青有利；积雪又是无水或缺水的冬、春草场的主要水分来源，可以解决人、畜饮水问题。但降雪过多，积雪过深，掩埋草场时间过长，又会影响牲畜放牧采食，形成“白灾”。为了趋利避害，保证牧区畜牧业的稳产高产，应采取以下防御白灾危害的措施：

(1)建立饲料饲草库，储草防灾　白灾的实质是缺草少料，造成牲畜“饥饿”所引发的灾难。因此，应该在牧草生长季节扩大打草场面积，或在水热条件较好的地区建立人工饲料饲草基地，种植饲料作物和优良牧草，开发草料资源，发展饲料工业，建立草库，围绕以冬草储备为主的草原基本建设，入冬前备足草料，是防御白灾危害的根本措施。

(2)加强棚圈建设　修建牲畜棚圈，使牲畜在积雪时有个安身之地，是保护牲畜安全越冬渡春的重要条件之一。

(3)调整畜群结构　在各种牲畜中，马破雪采食能力最强，羊次之，牛最弱。所以在白灾严重的地区，马在畜群中所占比例应该大些。当白灾强度不大时，可先放马，用马群破雪后，再放羊、放

牛,使各种牲畜都可采食,也可收到较好的抗灾效果。在适当的地区搞机械破雪,也是行之有效的措施。

(4)加强牧区气象预报和气象服务工作　广大牧民如能及时收听收看灾害性天气预报,灾前做好防灾准备工作,也能减轻白灾的危害。

第六章　农业气象情报预报

农业气象情报预报是农业气象学科的一个重要分支，是气象为农业服务的一种重要手段和有效形式。农业生产与天气气候条件关系密切，农作物生长发育离不开与之相适应的环境条件，天气现象对农作物生长发育和农业生产活动都会产生较大的影响。由于天气气候的地域性明显，使得农业生态及农业生产都具有鲜明的地域性特征，不同地区的种植制度和农事活动及存在的关键性农业气象问题也不尽相同。我国为大陆性季风气候，每年季风进退的早晚及其强弱，常导致旱、涝、酷暑、低温等农业气象灾害发生，也使年际间天气气候条件产生较大的差异，对各个地区作物的品种搭配、农事活动安排都有一定的影响。但对于一定区域来说，气候、农业生产条件和栽培技术具有相对稳定性。因此，需要开展农业气象情报预报服务，趋利避害，提高产量水平。

第一节　农业气象情报预报理论基础及常用方法

农业气象情报预报是根据农业生产的实际需要而编发的专业性气象情报和预报，是在分析已经出现的天气气候条件的基础上，提供的关于农业气象条件、农作物生长发育和产量状况、各种农业气象灾害发生的时间及其危害程度、农用天气条件、进行农事活动的适宜时期等方面的分析和预测。其中，农业气象情报是关于过去和当前已经出现的农业气象条件及其对农业生产的影响、农业气象灾害发生的范围及其危害程度的分析报道；农业气象预报是关于未来农业气象条件及其对农业生产活动和农作物产量方面影

响程度的预测。二者既有联系,又有区别,相互依存,互为补充。农业气象情报提供准确、可靠的实时信息,为准确地进行农业气象预报提供了科学依据。在编制预报时,可根据情报中所提供的已经出现的天气气候条件对农业生产所造成的影响,修正各种预报,提高准确性。同样,在编制情报产品时,可根据预报提供的预测结果提出生产上建议和措施,增强情报信息的针对性、适用性。

天气气候与农业生产的关系一直为广大生产者所关注,早在古代我国农民就以二十四节气和节令来安排农业生产,随着近代科学的发展,特别是近30年来,计算机、应用数学、卫星遥感以及地理信息系统、网络技术等先进科学技术的兴起和应用,使得农业气象情报预报在理论和方法上有了进一步的提高,进入了客观、定量化的新阶段。

一、农业气象预报的理论基础及常用方法

农业气象预报是一种专业性气象预报。它包括与未来从事的农事活动有关的天气条件的预报,是根据前期农业气象条件、农作物生长发育状况、未来天气演变预测结果而编发的农业气象条件、作物生育期、产量、灾害性天气等方面的预报。

在地球"土壤—植物—大气"系统的生物循环和能量交换过程中,各种现象的起始状态和终止状态间都存在着密切的联系,利用其客观必然性来做预报,是编制各种农业气象预报的科学原理。从现象的初始状态(如已经形成的农业气象条件、作物生长状况及其所处发育期等)中选出对其终止状态(如农事活动日期、作物发育期及产量等)最有影响的、起主导作用的因子,作为预报因子;利用两者间的内在联系,建立数量关系,用以预测未来变化趋势,是农业气象预报所遵循的法则。

(一)农业气象预报的理论依据

由于农业气象预报既与预报对象自身的规律有关,又与环境

气象条件演变的物理过程有关，二者的结合形成了农业气象预报所特有的理论依据，它主要有以下几个方面：

1. 环境气象条件对农作物和农业生产活动作用的持续性（亦称“惰性”或后延性）

环境气象条件时刻影响着农业生产过程，其中一些环境气象要素本身可以积累或贮存起来，以后逐渐对农作物的生长发育产生影响。降水量是最为典型的积累型要素，当降水渗入地下后，便可贮存在土壤中供作物根系吸收，逐渐消耗。灌溉量预报就是根据前期土壤水分累积量和作物需水量以及未来可能降水量来制作的。并且，在北方地区进行冬小麦产量预报时，前一年夏季降水量在农田中形成的底墒也常被视为其中的重要因子之一。当环境气象条件对农作物生长发育发生作用后，这种作用的效果可持续到以后的一段时间，对农作物生长发育产生影响，在一定程度上决定了未来农作物的发育和产量趋势。例如：在春季温度回升快的年份，越冬作物发育期提前，使后面的发育期也相应提前。再如：受冬前和春初的气象条件影响，冬小麦形成的分蘖数，决定了单位面积总有效穗数的多少，从而对最终产量产生影响。在实践中，作物物候期预报、利用农学模式进行的产量预报和近年来开展的遥感作物估产等就是基于这一原理而进行的。在一定的温度范围内，作物的发育速度随着温度的增高而加快。所以，在编制某些作物的发育期预报时，可将生长季内的平均温度、活动积温或有效积温作为预报因子。在编制农业气象产量预报时，单位面积植株数、叶面积指数、禾本科作物的有效分蘖数、每穗的小穗数和粒数、越冬作物越冬后存活的植株和茎数、遥感影像上的作物植被指数等生物要素都是重要的预报因子。由于上述作为预报因子的气象和生物要素变化较为缓慢，可使农业气象预报具有较长的时效性，而不依赖于中长期天气预报。

2. 各种农业气象条件对农作物发育和产量形成作用的非等

同性和不可取代性

对于一个地区而言，各种农业气象条件对农作物的作用不同，在光、温、水三要素往往只有一个或二个要素对作物生长发育和产量的影响是主要的。如：在干旱地区，水分条件是主要影响因子；而对于湿润地区而言，温度则是主要影响因子。由于农作物在不同的生育阶段对气象条件的要求有所不同，对各种气象因子的反应特性也有所改变，因而同一气象因子在农作物的各个生育阶段的重要性也不同。在一定的时期内，作物对外界环境的变化反应十分敏感，也就是所谓的临界期。在此期间，环境条件稍有改变，就会对作物生长发育和最终产量造成明显影响。在作物的生命周期中存在着水分、温度和光照等临界期。例如，水稻的幼穗分化阶段对温度因子十分敏感，一旦出现低温，就会严重影响产量。由于天气气候条件的不断变化，各个时段的气象条件对作物的满足程度也有所不同。其中，气候条件与作物的需求矛盾最为突出的时期就是所谓的气候关键期。如：玉米在孕穗阶段要求充足的水分，而在一些地区正是少雨季节，如果在这一气候关键期遭遇干旱，就会造成玉米的“卡脖旱”，严重影响产量。在编制农业气象产量预报时，可通过作物生长发育与当地气象条件关系，找出影响作物生长发育和产量形成的主要气象因子和关键时期，以气候关键期的主要气象因子为预报因子，生物意义明确，可提高准确率。

3.农作物生长发育对环境条件反应和天气气候演变的前后相关性

在“土壤—植物—大气”系统中，各种生物物理现象和过程是相互联系、相互作用的。首先体现为现象和过程在时间上的相关性，其次是在空间上的相关性。农作物作为有机体，在其生命周期中各发育阶段是相互关联的。例如，在春季气温偏高的年份，作物发育期提前，即便后期气温偏低，发育期也无法倒转。并且，前期气象条件造成的农作物生长发育状况的好坏虽然可以通过栽培措

施加以调节，使其后的生长发育状况有所改变，但有一些无法逆转的生物性状将会持续下去。譬如，禾本科作物在拔节后期遇到较强的低温，使雌雄蕊分化受到严重影响，产生许多不孕小穗、小花，即使后期环境条件好转，也不能改变减产的局面。另一方面，大气运动和天气气候演变过程具有各自的韵律和周期特征，在时间顺序上存在着一定的关联性。如：台风均是由海上的热带低气压演变而来的。这种前后的关联性为农业气象预报中相关律的应用提供了生物学和物理学基础，使运用前期气象条件估测作物生育后期变化趋势成为农业气象预报的有效途径之一。

4.农业气象要素和农业生产的相对稳定性

气象条件在一定的区域内分布比较相似，差异较小。如辐射、温度、降水等虽具有明显的区域性，但在区域内的空间变化较小，形成了区域气候特征。因而，使得农作物的生长发育和产量形成过程也具有相同的特点和相似的变化趋势。例如，生长季内温度偏高或降水偏少的现象，往往会在一个大区域内出现。基于这一原理，在编制较大地区的农业气象预报时，选择一些有代表性测点的资料建立预报关系就可以达到预报精度要求。在得到相似区域中代表性点的预报关系后，对该区中其他地点可采用类推或相似分析法做出预报，把点和面的预报有机结合起来。虽然各年天气气候条件和农业生产情况不尽相同，年际间差异可能较大，但多年平均状况是相对稳定的。对于某一地区来说，各年通过某种界限温度的日期不同，但其多年平均状况与差值在一定的范围内变动。因此，可以利用各种要素的平均状况和极值、界限值发生的频率来进行农业气象条件预报。

（二）农业气象预报常用方法

由于农业气象预报涉及到大气运动的演变和农作物的生长发育，因而，与天气气候变化、农作物生长发育和产量形成规律有关的统计学、天气学、气候学、物候学等科学也是农业气象预报理论

基础的一个方面。

1.统计学方法

统计学方法以概率论、数理统计理论为基础,以数学分析为手段,预测农业气象条件和预报对象未来的变化。由于受各种因素的干扰,使农业气象预报对象的变化不仅表现出自身的韵律和周期,而且还呈随机变化的形式。因此,可以运用统计学的理论,按照环境气象因子的概率分布来预测未来的农业气象条件以及作物产量趋势。如可采用回归分析、聚类分析、随机过程分析等方法。统计学方法能比较客观、定量地揭示各种随机变量之间的内部规律,反映出农业生产对象和过程与环境气象条件之间的相关关系,是农业气象预报中应用最为广泛的一种方法,适用于各种农业气象预报。

2. 天气学方法

天气学方法以天气学原理为基础,以天气气候分析为手段,针对农业生产中存在的天气气候问题,预测作物生育期内可能出现的天气条件。生长季的天气条件直接影响着农作物生长发育和产量的高低,天气的变化取决于以大气环流为背景的天气形势的演变而引起的天气系统的发生、发展和移动。如:以表示副热带高压强弱程度的要素为因子,进行长江中下游地区的梅雨期及其长短和北方入汛期的农用天气预报。由于天气形势演变具有连续性和相似性,通过分析天气系统过去的演变趋势,可推断未来的关键农时的天气形势变化,其物理意义明确,准确率较高。这种方法最初被用于农用天气预报,后来又逐渐被应用到农业气象灾害、病虫害预报和农业产量以及年景预报。

3.气候学方法

气候学方法以气候学原理为基础,以气候资料分析为手段,预测未来较长时间内,气象条件可能对农业生产造成的影响。气候是太阳辐射、下垫面性质和大气环流多年作用的结果,气候背景和

变化规律是各种天气形成、演变的主要基础。因此，可通过分析各种对气候影响较大的因素，研究其变化规律，预报气候条件对农业生产的影响。如：采用太阳黑子、大气环流指数、海温等要素作为因子，预报作物产量。由于气候演变具有地域性广、时间长和相对稳定等特点，因此用气候学方法得出的预报指标、模式准确率较高，被用来编制生长季水分条件、热量条件、作物产量和农业年景等长期或超长期农业气象预报，同时也被用来编制各种农业气象灾害和病虫害等预报。近年来，随着人们对“厄尔尼诺”和“拉尼娜”等现象的深入研究，异常气候的研究成果也被引入到预报机制中来。

4.物候学方法

物候学以生物学原理为基础，以物候资料分析为手段，利用当年的气象条件或物候现象预测未来农业生产和生物生育状况。自然界中各种生物都有自己的生物学特性，它们对光照、温度等环境气象要素的反应的敏感程度不一，其生长发育状况及生活活动所表现出的物候现象是对外界环境条件的综合反映。它不仅能反映出当时环境条件的特点，而且还能反映出过去一定时期内各种天气气候条件对生物作用的综合情况。例如，春季北方冬小麦返青期的早晚，常反映出初春回暖状况。因而，根据某些物候现象可以预测未来的天气条件、农作物的生长发育状况及其产量。

5.数学物理方法

数学物理方法以相似性原理为基础，以分析模拟对象变化的物理过程和机制及环境条件为手段，将农业气象过程解析为一系列生理、生化、物理或生物物理过程，用数学方法来描述这些过程，通过求解方程来预测未来发展状况。如模糊数学、灰色系统等方法的应用。由于这类方法对生产过程的物理过程和机制研究较深，使农业气象预报由定性向定量方向发展。随着各种测量手段和计算机技术的发展，农业气象预报近年来在数值模拟和应用数

学方法上不断更新提高,被用于各种农业气象预报。

6.卫星遥感方法

卫星遥感方法以辐射感应原理为基础,以遥感数据和图像分析为手段,利用获取的大范围地表及环境自然景观信息,分析天气气候对农作物生长发育的影响,进行动态预报。遥感资料系统收集地表及其环境的各种信息,根据作物反射光谱特性,获取农作物生长发育状况、种植面积等的宏观信息,无需进行实物采样。在进行作物产量预报时,可利用遥感植被信息获取作物播种面积以及与产量有关的生物因素,如将冬小麦拔节前后的生物量、大豆开花结荚期的最大生物量、水稻齐穗前的植被指数等,作为重要预报因子。由于利用遥感手段能及时发现和掌握农业生产对象的各种变化特点,因而,这种方法常被用来编制农田土壤水分预报、作物发育期和产量预报、农业气象灾害和病虫害的预报。

二、农业气象情报的理论基础及常用方法

农业气象情报是在分析、鉴定过去和当前的天气气候条件对农业生产综合影响的基础上,对其进行客观描述,提出合理措施和建议的实时报道。它包括过去一段时间内气象与农情变化的实况、天气条件对农业生产的影响程度、未来可能出现的天气条件及其对农业生产可能造成影响的分析、相应的措施和对策。由于农业生产大部分是在自然状态下进行的,农作物在其生长发育的进程中因受到各种环境因素的综合影响,而导致不同的产量结果。在诸环境因素中,气象要素对农业生产的影响较大,因此,及时、准确地将农业气象情报信息传送给用户,才能使得有关部门和广大农民能够及时了解和掌握农作物生长发育的动态,根据各种年型,采取相应措施,趋利避害,使农业投入与产出达到最佳状态。

(一)农业气象情报的理论依据

农业气象情报既有农业气象学的特点,又具有情报信息学特

征。它既包括了农作物生长发育及环境气象条件的分析评价，又包括了未来天气展望与生产措施。它与农业气象预报既有共性，又有各自独特的专业性。它主要依照以下几方面的理论依据：

1.农作物生长发育对环境气象条件的依存性

农作物的生长发育过程中，环境因素对其进程有着直接的影响，不同的光、温、水条件在各时段的组合可对农作物产生不同的生理和生物效应。这些条件可使作物的物候期相应提早或推迟，长势健壮或纤弱，在极端的情况下甚至对作物造成伤害，影响其正常生长发育，而这种影响可持续并直接影响到最终产量。各种要素对农作物的作用机理不同，在各个阶段所起的作用也不同。首先，温度在农作物生命过程中起着重要作用，任一种作物的生长发育都存在着三基点温度，即最高、最低和最适温度。在最适温度内作物生长发育最快；在最高和最低温度下，作物生长发育停止；如果温度继续升高或降低就会使作物受害甚至死亡。其次，作物在一定的发育阶段对光照时间的长短十分敏感，有光周期现象，长日照作物在发育的过程中需要日照长度达到一定长度，才能开花结实；而短日照作物则需日照短于某一临界长度才能开花。再者，水分是一切生物维系生命的重要因素，在适宜的范围内，作物光合速度较快，长势良好；水分过多和过少都会造成作物生理失调，产生危害甚至导致植株死亡。在某一特定的发育阶段，作物会对环境条件有特殊要求，如：冬性较强的冬小麦品种必须经过一定强度的低温阶段才能完成春化反应，否则将不能结实。因此，在编制农业气象情报时以作物对环境条件反应特性为依据，能够客观地评价环境气象条件对农作物生长发育的影响程度。

2.农作物对气候环境的适应性

农作物在其生长过程中受到各种环境因素的制约，经过多年的气候驯化，每一特定地区都形成了特有的作物生态类型和相应的种植制度以及据此而展开的一系列农事活动。以种植制度为

例，东北地区纬度较高，生长季短，热量不足，形成了一年一熟的熟制，农事活动也相应地在春、夏、秋3季进行；而西北、华北等地的生长季长于东北，形成一年两熟的种植制度，长江以南大部地区热量充足，作物一年四季均可生长，种植制度为一年三熟。作物生长发育和农事活动以年为周期，周而复始，具有明显的规律性。当有异常气候出现时，作物由于不能适应突变的环境条件而受到伤害，使生长发育受到阻碍。例如，越冬作物在越冬过程中能经受一定的低温，黄河以北地区通常种植强冬性或冬性品种的冬小麦以抗御寒冬，而黄河以南地区则会种植弱冬性或春性品种冬小麦，当气候发生异常，出现几年甚至十几年一遇的严冬时，气温低于作物所能忍受的临界温度，就会发生冻害。由于长期的气候适应性使得各地区的种植制度和作物品种相对稳定，对于同一气候区年内各种农事活动也是有规律可循的。农业气象情报周年服务一览表正是基于这一原理编制而成的，可以此为依据制定全年服务计划，开展服务。

3.异常气候对农业生产影响的二重性

异常气候常使特定地区的气象要素与多年平均状况产生较大差异，这种差异对农业生产所造成的影响与差异的程度、出现的时间及地点有关，利弊不一，具有二重性。以温度为例，如果夏季低温出现在江南地区可使该地区的早稻充分灌浆，提高产量；如若出现在东北地区轻者会使作物发育延缓，重者会使作物遭受冷害。与之相反，如果盛夏的酷暑高温出现在江南地区就会造成早稻高温逼熟，缩短灌浆期，而降低产量；但如果出现在东北地区就能保证作物正常开花授粉，提早成熟，避免早霜危害。再如，暖冬气候虽然使越冬作物的冻害和死苗率降低，但同时也为病虫越冬提供了有利条件，往往会造成生长季内病虫害大流行。因此，当异常气候出现时，正确判断其对农业生产的影响，编制农业气象情报，及时提出措施和建议，趋利避害，可收到良好的服务效果。

4.农作物对不良环境条件的生理可调节性和抗御性

农作物生长发育遵循着自身的节律,随着季节的变化完成从发芽到结实收获的生命过程,当外界气象条件发生变化时,作物体自身会调节其生理过程的反应速率,以适应环境的变化。如在夏季正午前后高温、强光照的条件下,作物会出现“午休”现象,以避过高温危害。再如,入冬时,当日平均气温下降到0℃左右,北方冬小麦地上部分便进入休眠状态,待到翌年气温回升后再恢复生长。当部分环境因素不能满足作物的生长发育需求时,作物体会产生抗逆性,以逐步适应环境,等到环境条件好转时,可恢复正常生长。如在秋旱的年份冬小麦往往扎根较深,以吸取较深层土壤的水分,维持生长。作物体受到的伤害有相当一部分是由某种不良环境因子经过一段时间累积而造成的,如作物干旱是由于长时间少雨,农作物生理用水得不到满足而引发的。在一定程度上,气象因素对农作物生长造成伤害时,存在着致害的临界点。超过临界点后,灾害就会发生。如降水适量时有利于农作物的生长发育,过多便会造成渍害甚至形成洪涝灾害;当降水量过少时就会出现旱灾,同样会影响作物生长。当外界的不利气象条件对作物的影响尚未达到使其产生不可逆的生理过程时,采取相应的技术措施对环境进行调节,可使作物恢复正常。在一定的范围内,某种致害因素还可以通过调节变为有利的因素。典型的例子是旱地作物栽培中应用的有限水分胁迫原理,如冬小麦等作物在生长过程中的某一时段受到一定程度的水分胁迫,使蒸腾强度等生理机能降低,当恢复正常水分供应时,生理机能加强,可使产量提高。因此,在不良天气条件开始出现时,提供情报服务,使农户及时掌握有关信息,采取措施调节作物生长环境,可使作物发育向有利的方向转化。

5.农业气象信息资源的多用性

农业生产是一连续、可操作过程,可通过人为的控制或采取相应措施,实现过程中的某些目标。在农作物的生长发育的进程中,

环境条件始终起着重要作用,使其向着有利或不利的方向发展。如果将农业生产与环境要素的有关信息及时传递给用户,可以使生产者通过人为的调节使生产向有利的方面转化。由于农业气象情报是多学科的综合产物,它包括了天气气候、土壤水分等环境要素及农作物的生育状况和灾情分布等方面的信息,适合于不同级别的用户。譬如,农业部门可根据有关信息判断农作物的长势和生产中存在的问题,指导农业生产;民政部门可以利用有关信息指挥防灾救灾;粮食流通部门可根据信息中粮食及油料作物的收成情况对粮食进行调配,安排进、出口贸易;对于广大农户,则可从信息中了解到前期气象条件对农作物生长发育产生了何种影响及应采取的相应措施;农业气象科研人员可利用信息中的各种环境要素值和农作物生长发育数值化信息作为资料,进行科研。另一方面,由于天气气候和农业生产随季节推移而变化,每一时段的农业气象情报所包含的信息要素正是农业气象预报所需的初始状态值,利用这些信息,可进行农用天气、作物发育期及产量、土壤水分方面的预报。

(二)农业气象情报的常用方法

农业气象情报基于天气气候学、生理学、农学、土壤学和信息学等学科的理论,揭示环境气象条件和农作物生长发育的内在规律,正确评判作物生长的各个阶段已出现的气象等环境条件对农业生产的利弊影响,评价已发生的农业气象灾害的程度、波及范围,提出措施建议。因而,依照基础学科理论进行正确的评判是农业气象情报的最为重要的方法。

1.指标评判方法

指标评判方法是以植物生理学为基础,根据农作物对环境要素适宜和致害指标判断农作物生长发育状况的方法。农作物在其生长发育过程中受到各种环境因素的综合影响,最终形成不同的产量结果。由于农作物在其适宜的光、温、水条件下可获得较大生

长势，而当其中某一环境要素发生变化，达到某种程度使作物不能适应时，生长便会受到抑制，甚至出现不可逆的生理现象，导致产量急剧下降。因此，采用一些环境要素指标来评判作物生长环境的适宜程度和农业气象灾害的发生、发展方法在农业气象情报中被广泛采用，使评价更加科学、客观。例如：在农业气象条件评价中根据作物三基点温度和累积温度状况来评价作物生长季内的热量状况；以作物各生长阶段的需水量为指标来评价水分状况对作物需水的满足度。在评判中一般采用两类指标，即作物生长发育的评判指标和农业气象灾害指标。由于农作物的种类繁多，品种和熟制各样，加之各地区气候背景不一，因而，采用的指标也会因地区不同而有所差异。这种方法较为实用，具有可比性。

2.天气气候学评价方法

天气气候学评价方法是以天气气候学为基础，根据气候年型对作物农业年景和农业气象灾害年型做出评价的方法。天气气候对农业生产的影响较大，不同的气候年型，可导致大范围各种作物的丰歉结果。因此，采用气候年型来评价各个大区域的主要农业气象灾害发展状况、各种作物的农业年景，可以定性地判断出气象条件对农业生产的影响。例如，在目前的生产水平下，凉夏年份，东北地区生长季热量不足，可导致大面积的作物减产；华北地区伏旱的年型可使秋粮大面积歉收。特别是在气候异常的年份，如“厄尔尼诺”年，气候对区域性的农业生产影响更为明显。这种方法具有可比性，可比较出年际间农业气象条件的差异。这种方法被用来制作年景和季节农业气象情报。

3.农学评价方法

农学评价方法是以农学理论为基础，根据农作物生长发育性状，评价作物各生育时段气象条件对产量结构的影响的方法。农作物的生长状况是前期环境条件综合影响的结果，诸如禾本科作物分蘖数、有效穗数、穗粒数的多少等，直接关系着最终产量的高

低。因此,对作物性状进行评价,可以及时发现生产中出现的问题,提出对策,对农业生产进行科学管理。例如,北方冬小麦在入冬晚、开春早的气候背景下,反映出的生物性状是分蘖多,群体大,在产量形成上可能以多穗型为主。相应地在生产上采取的措施是控制无效分蘖,增加肥水保证一定数量的有效分蘖成穗。作物生产力要素主要由作物的生物学产量和经济系数构成,而相同的气象条件作用于作物不同生长发育时期会产生不同的效果。以禾本科作物为例,其早期的气象条件决定了植株的分蘖数,成为产量构成中单位面积穗数的基本要素;而在作物生育中期气象条件则决定了其穗粒数和结实率,后期的气象条件决定了籽粒的灌浆速度。

4.遥感评价方法

遥感评价方法是以遥感理论为基础,通过遥感数据和影像分析提取作物播种面积和长势、旱涝和病虫等灾害范围及危害程度的信息进行评价的方法。由于遥感影像覆盖面广,反映的是农作物生长发育及灾情的宏观综合情况,将此信息与地面监测网收集到的网点观测资料相结合,可使评价更加客观、准确。例如,在进行作物专题分析时,可根据遥感图像提取的绿度资料来分析作物长势,判断较大范围内农业生产存在的问题;在洪涝灾害发生时可根据影像判断出农田过水和积水面积。通过遥感手段获取的面上信息,弥补了地面观测站网因网格区域过大而丢失信息的缺陷,形成地面与空中、点与面结合的农业气象情报综合评价方法。

第二节 农业气象情报、预报的种类与内容

一、农业气象情报的种类和内容

农业气象情报大致可分为实时情报、专题情报和情报咨询3

大类型。

(一)实时情报

是针对刚刚过去的一段时间内的农作物生长状况、已经发生的农业气象条件实况,以及气象条件对农作物生长发育的利弊影响而编发的农业气象情报分析。它主要包括农业气象日报、农业气象周报、农业气象旬报、农业气象月报、农业气象季报和农业气象年报等。

(1)农业气象日报　重点反映和阐述前1日(或前2日)的降水量、极端温度和农业气象灾害对农作物的利弊影响。

(2)农业气象周报　主要反映和阐述过去1周内农作物的生长发育情况、农业气象条件实况及其与常年的对比、周内出现的农业气象灾害及其所影响的作物类型和影响的程度等,综合分析气象条件对农作物生长发育的利弊影响。

(3)农业气象旬报　主要反映和阐述1旬内作物的生长发育情况、土壤墒情状况、气象条件实况及其与常年的对比、旬内出现的农业气象灾害及其所影响的作物类型和影响的程度等,综合分析气象条件对作物生长发育的利弊影响,并针对下1旬可能出现的气候情景,为农业生产部门提供一些建议或措施。

(4)农业气象月报　反映和阐述1月天气实况及其与常年的对比,分析月内气象条件对主要农作物生长发育的综合影响,综述月内主要农业气象灾害的发生与影响情况。

(5)农业气象季报　除时间尺度为1个季度外,主要内容与月报基本类似。

(6)农业气象年报　着重分析和阐述上1个农业年度的气候年型。分析光、温、水等基本气象条件以及主要农业气象灾害对农作物各发育期和产量丰歉的影响。

(二)专题情报

指具有明确目的和单一项目的农业气象情报分析。主要包括

作物专题分析、干旱情报分析、暴雨情报分析、病虫情报分析、作物播种期或收获期情报分析,等等。

(1)作物专题分析　包括冬(春)小麦、春(夏)玉米、双季早稻、中(一季)稻、双季晚稻、棉花、油菜、大豆等作物的专题分析。它着重分析各作物从播种至收获全生育期的农业气象条件、农业气象灾害及其影响程度,综述气象条件对作物产量丰歉的影响。

(2)干旱情报分析　是针对干旱的发生范围、持续时间、发生程度、影响对象和影响程度等展开的分析,并尽可能地预测未来可能的发展趋势,提出防御措施和建议等。

(3)暴雨情报分析　主要分析暴雨出现的时间、暴雨量、影响的作物种类,以及造成的危害等。

(4)病虫情报分析　主要针对农作物发病或害虫发生情况而编发的农业气象情报分析。病、虫害分析的内容包括发生时间、发生范围、影响程度、蔓延和防治情况等。

(5)播种(或收获)期情报分析　主要分析播种(或收获)时期的气象条件是否有利,以及可能产生的影响和应注意的问题等。

(三)情报咨询

指针对政府决策部门或农业生产单位的某些要求而进行的特殊农业气象情报分析。从某种意义上讲,情报咨询是一种较为综合的情报分析。比如,为参加国家有关部门召开的农业生产形势分析会、全国粮食产量预测预报会商会等而提供的农业气象情报分析材料。它与实时情报和专题情报相比,具有时间跨度长、内容广泛、综合性强等特点。

二、农业气象预报的种类和内容

农业气象预报的种类主要包括农业气象条件预报、农作物物候期预报、农业气象产量预报、农业气象灾害预报、农用天气预报、森林火险预报和渔业气象预报等。

(一)农业气象条件预报

主要包括作物生长期间的热量条件预报、农田土壤水分预报以及农田灌溉预报等。

(1)热量条件预报 针对作物生育期或某一阶段的热量状况而进行的农业气象条件预报。

预报作用:①制定种植计划。不同作物或不同品种对热量的要求不同,根据当年的热量条件预报,可以调整作物的种植比例。如高温年,多种喜温作物或晚熟品种;反之,则宜多种耐凉作物或早熟品种。②确定播种方法。幼苗的出苗速度和生长状况与土壤温度密切相关。春温高,利于出苗,播种深度较深为好,反之,浅播种,有利出苗、全苗、壮苗。③为农业产量预报提供依据。作物生育期间如果温度过低,易导致冷害,籽粒成熟不正常,影响产量;如温度过高,又易发生高温逼熟,籽粒不满,同样影响产量。④为制定合理的田间管理措施提供依据。如前期热量不足,作物生长迟缓,则应减少灌溉或提前灌溉,少用氮肥,多施磷钾肥,促进作物发育;反之,多灌水,多施氮肥,促进作物生长,有利作物高产。

(2)农田土壤水分预报 针对作物根层或其他规定土层内未来一段时期的土壤含水量而编制的农业气象条件预报。农田土壤水分预报需针对作物各生育时期分别进行,并根据作物对水分的需求,对土壤水分供应状况的好坏做出判断。

(3)农田灌溉预报 根据气象条件和作物需水规律推算最适宜的农田灌溉时间和灌溉量的农业气象条件预报。它是农田科学管理的重要依据,是调节土壤水分、为农作物在各生育时期创造适宜的水分条件、合理利用水资源的基础工作。

(二)农作物物候期预报

包括播种期预报、各发育期预报和收获期预报。

(1)播种期预报 针对作物适宜播种时期编制的作物物候期预报。它可以帮助农业生产单位适应每年变动的天气条件,将播

种作业安排在最适宜的时段,保证苗齐、苗全和苗壮。预报内容:①影响作物播种的前期天气条件;②未来天气条件的预报及其对播种期影响的鉴定;③综合分析做出适宜播种时期的预报;④应采取的农业技术措施及建议。

(2)发育期预报 针对作物某一发育期到来的日期而编发的作物物候期预报。在鉴定气象条件对作物发育速度影响的基础上,根据未来的气象条件和有关自然物候指标制作预报。及时准确的作物发育期预报,可为追肥、灌水、病虫防治以及作物收获等栽培措施提供依据。确定作物某个发育期到下一个发育期之间的发育速度,是编制作物发育期预报的关键。作物发育速度与它本身的生物学特性、光照、温度、水分等气象条件、土壤条件以及栽培措施等有关。在土壤条件、栽培技术和管理水平相对一致的情况下,发育速度主要取决于作物的生物学特性及气象条件。作物种类、品种以及发育时期不同,对光温等条件的反应有明显差异。

在作物生物学零度和适宜温度上限范围内,发育速度随温度升高而加快。感光性强的作物和品种,除了受温度影响外,日照长短和光照强弱也在一定程度上影响作物的发育速度。

(3)收获期预报 针对作物适宜收获日期和收获时的天气条件而编制的作物物候期预报。作物收获日期与前期天气条件、作物种类、品种特性以及后茬作物的安排密切相关。收获时天气条件分析不仅取决于天气条件本身,还跟作物的生物学特性以及农事活动对气象条件的要求有关。作物收获期预报便于生产单位根据当年作物生育进程和天气条件,将收获安排在最有利的时段,既能防止早收造成减产,避免或减轻因不利条件对产量和产品质量所造成的危害,又能在收获前作好充分准备,进行农机具准备和劳力安排。此外,对后茬作物的合理布局和品种搭配,也有重要意义。

(三)农业气象产量预报

它是当今世界各国开展得比较广泛的一种农业气象预报。由

于政治和经济的目的，一些主要农产品出口国，如美国，不仅编制本国的农作物产量预报，而且还编制世界范围的农作物产量预报。

农业气象产量预报是根据农作物播种前及其全生育期内的气象条件，特别是关键发育阶段的气象条件利弊来预测农业生产对象最终产量的一种农业气象预报，它同时也是农业产量预报的一种。农业产量的形成不仅与农作物的品种特性、农业技术水平、土肥条件、病虫害等因子有关，而且与环境气象条件的关系尤为密切。在影响产量的各种因素中，气象因子往往起着重要、甚至是关键性的作用。因此，分析研究农业生产对象与环境气象条件间的定量关系，根据气象条件来预报农业生产对象可能形成的最终产量，在农业气象预报和农业产量预报中占有重要地位。预报原理：①如果未来天气正常，那么用作物生长前期已经出现的天气条件估量作物的现状，这种作物生长现状决定了它未来的生产能力。②用气候资料推算未来天气的概率分布，并据此确定作物未来的可能变化及其相应的生产能力。③假定种植的大田作物群体每年都有相同的生长发育过程，则由于各天气要素，尤其是温度和辐射，在一定范围内是相对稳定、均匀分布，所以，只需要选用几个代表站点，就可以估测该地区的作物产量。④由于预报模式在一定程度上考虑了作物前期的生长状况及土壤条件等所谓惰性参数，所以，一定范围单位面积的平均产量或总产量的趋势预测有一定的准确性。

目前，在我国农业气象产量预报是最为规范和业务化水平最高的一种农业气象预报。根据不同手段、不同要求、不同对象可分为以下几类。

1.按预报模型分类

按预报模型可分为：统计预报、遥感预报和动力生长模拟预报3种。

(1)统计预报　它是在没有全部揭露作物产量与气象影响因

子内在因果关系的情况下，采用各种相关回归技术探索作物产量与影响因子之间的统计关系，建立相应的统计预报模式，经显著性等检验后应用于业务预报的一种农业气象预报方法。这种方法比较客观、严密，是目前实际预报中应用最为广泛的一种方法。

(2)遥感预报　它是利用空间遥感(包括航天遥感和航空遥感)资料和地面遥感(即地面野外光谱测定)资料与作物的生长状况和产量之间的关系，建立回归模型来估算作物产量的一种方法。是遥感技术在农业气象产量预报中的应用。目前，国内在这方面应用较为成熟、且已经业务化的仅有利用气象卫星资料建立的北方冬小麦产量预测预报方法。但是，这一方法也只有在大量的地面观测资料支持下，预测效果才会较好。其他作物产量的遥感预测预报方法尚处在研究或试用当中。

(3)动力生长模拟预报　是利用作物生长发育的观测资料和环境气象资料，从模拟作物生长发育的基本生理过程着手，最终模拟作物产量的形成和积累的一种产量预报方法。它是用系统科学的观点模拟处理作物的整个生长过程，是农业气象数值模拟方法在农业气象产量预报中的一种具体应用，是农业气象产量预报的新发展。其模拟结果将定量地描述作物生长发育和产量形成与环境气象条件之间的关系。但由于其模拟过程涉及到大气中的各种物理过程、生物圈中的各种生物和化学过程，因此，其模拟过程要比一般大气过程的数值模拟要复杂得多。目前，还很难投入业务应用，仍处于研究或小范围试报阶段。

2.按预报时效分类

按预报时效可分为：年景预报、趋势预报和定量预报 3 种。

(1)年景预报　根据对未来天气气候的长期预测结果，结合作物的生长发育过程及其对气象条件的需求，评述气象条件对作物生长发育和产量形成的利弊影响而编制的农业气象预报。一般在作物播种前后发布，它对指导种植计划有非常重要的意义。

(2)趋势预报　根据作物播种前后至收获前2个月的气象条件及其对作物生长发育的利弊影响，和对未来天气气候的预测及其影响评价，而对作物产量丰歉趋势进行预测的一种农业气象预报。一般在收获前2个月发布，对指导农业生产和田间管理有一定的现实意义。

(3)定量预报　根据作物播种前后至收获前1个月的气象条件及其对作物生长发育的利弊影响，和对未来天气气候的预测及其影响评价，而对作物产量进行预测、预报的一种农业气象预报。一般在收获前1个月发布，对指导粮食储运、流通和消费有一定的参考价值。

3.按预报对象分类

按预报对象可分为：粮食作物产量预报、经济作物产量预报和名特优小宗农产品产量预报3种。

(1)粮食作物产量预报　粮食作物产量预报在我国气象部门开展得比较广泛，从国家到省、地、县基本都已投入业务运行。其内容主要包括粮食总产量预报、小麦产量预报、玉米产量预报、双季早稻产量预报、中(一季)稻产量预报、双季晚稻产量预报、大豆产量预报等。

(2)经济作物产量预报　经济作物产量预报主要包括棉花产量预报、油菜产量预报和花生产量预报等。目前我国多数省、区气象部门都开展了此项业务。

(3)名特优小宗农产品产量预报　主要包括绿豆、红小豆、板栗、金丝小枣等农产品产量预报。此项预报是国内个别省、区、县气象部门根据用户的特殊要求而开展的非常规业务预报。

(四)农业气象灾害预报

包括霜冻预报、冻害预报、寒露风预报、低温冷害预报、干热风预报、土壤干旱预报及作物病虫害预报等等。

(1)霜冻预报　针对霜冻对作物、果树等的危害而编制的一种

农业气象灾害预报。预报前应先找出不同强度的最低温度与作物遭受危害的关系。预报内容包括低温强度、持续时间、分布范围以及霜冻类型等。及时准确的霜冻预报，便于农业部门在霜冻来临之前和发生后，决定对策、采取措施，使作物、果树等减轻或免遭危害。

(2)冻害预报　针对冻害对越冬作物和果树、林木造成的危害而编制的一种农业气象灾害预报。在我国应用较多的是冬小麦越冬冻害预报。冬小麦越冬冻害虽然主要是由于低温引起的，但在很大程度上又取决于冬麦本身的生长发育状况，即冬麦本身的抗寒性。

冬麦的抗寒性与品种特性、冬前麦苗的生长状况和秋末冬初麦苗的抗寒锻炼等有密切关系。一般说来，强冬性品种比较抗寒，春性强的品种抗寒性较弱；冬前单株平均有 3～4 个分蘖，平均次生根在 3 条以上，分蘖节距地面 3 cm 左右，每 667 m^2(1 亩)总茎数为 70 万～90 万个的麦苗安全越冬最为有利；冬前抗寒锻炼较充分的麦苗，抗寒性较强。由此可见，冬麦的抗寒性与秋末冬初的气象条件关系密切，若条件良好，冬麦的抗寒性可达到该地区的最大值，反之，抗寒性就要受到明显的影响。所以，在制作冬麦越冬冻害预报时，必须考虑上述因子的影响。

(3)低温冷害预报　针对作物生长期间可能发生的异常低温过程及作物可能受害状况编制的农业气象灾害预报。异常低温过程是指在作物营养生长期或生殖生长期出现的持续时间较长的夏季低温或秋季低温，使作物生理活动受阻，生殖器官受害，导致生育期推迟的低温过程。由于在它出现的前后，温度和其他气象要素没有剧烈变化和巨大差异，它的致害过程不易被察觉。低温危害是一种累积效应，一旦出现，造成的灾情重，受害范围大。低温冷害预报一方面要求对未来时期的低温过程进行预测，同时要考虑未来时期作物的生育过程，并估测作物受害的可能性和受害程

度。

(4)寒露风预报　又名南方晚稻产区秋季低温冷害预报，是低温冷害预报的一个特例。它主要包括晚稻抽穗开花期出现的时间预报和秋季温度条件的预报。抽穗开花期预报实际上是作物物候期预报的问题，温度预报应属于天气预报的范畴。寒露风预报就是把二者结合起来，并利用不同地区和不同品种的寒露风危害指标而编发的农业气象灾害预报。寒露风的危害指标因品种和地区不同，而有所差异，一般认为晚稻受寒露风的危害指标是：粳稻为抽穗开花前后5日平均气温小于20℃，籼稻为抽穗开花前后5日平均温度小于22℃。但各地在确定本地区的危害指标时，一定要因地制宜地从当地的气候特点、品种特性、农业技术措施等实际出发，具体地分析、研究确定，使指标更加客观化。

(5)干热风预报　针对干热风对作物的危害而编制的农业气象灾害预报。内容有干热风类型、强度、开始和持续时间、出现范围等。预报的步骤：①确定干热风的强度指标。干热风对作物的危害是气象条件和作物本身相互作用的结果。同一强度的干热风对处于不同生育期、不同生长状况的作物，危害程度不同。②分析和预报出现干热风的天气形势和环流系统。③预报作物关键物候期。④根据前期天气形势和征兆及干热风强度指标、作物的关键物候期预报，做出干热风出现的时间、强度及持续时间的预报。

(6)土壤干旱预报　在农田土壤水分预报的基础上，结合农作物的需水和耗水规律，以及土壤干旱的农业气象指标，对未来一个时期土壤干旱发生与否、持续时间和危害程度而编发的农业气象灾害预报。

由于土壤干旱的严重程度主要取决于土壤中的有效水分含量和作物状况，而未来的土壤水分状况不仅与当前的土壤水分含量有关，也与未来一段时间内土壤水分的变化量 ΔW 有密切关系。而 ΔW 是由该段时间内土壤水分的收支状况决定的，即由这段时

间内的天气条件、土壤水文条件、作物状况、农业技术措施等许多因子决定的。在具体预报时，不可能全部考虑这些影响因子，往往忽略某些影响较小的次要因子，只考虑某种特定条件下，对 ΔW 影响较大的因子。

在土壤干旱预报中常用的干旱指标有：①用土壤含水量或土壤有效贮水量表示的干旱指标。一般当土壤含水量为田间持水量的 60％以下时可视为干旱露头，50％以下为旱象发展，40％以下为旱象严重。②用降水量或降水相对变率表示的干旱指标。对于不同地区，因土壤条件、气候条件不同，加之作物种类、品种及不同发育期需水情况各异，因此，应根据具体情况确定相应的土壤干旱指标。

(7)作物病虫害预报　针对作物病虫发生与蔓延的气象条件编发的农业气象灾害预报。气象因子不仅直接影响病虫的生长、发育、生存、繁殖和蔓延，造成病虫不同的发生期、发生量和危害程度，而且通过对寄生植物或其他生物(如天敌等的)的作用，间接影响病虫的发生与消失。所以根据前期气象因子可以预测病虫的发生情况。作物病虫气象预报是病虫测报工作的重要组成部分。它可为及时、准确地拟定综合防治计划，采取必要的措施，经济有效地抑制病虫的发生数量，提供气象依据。有以下预报种类：

按预报内容可分为：①发生期预报。预报病虫的发生或危害时期；迁飞性害虫，预报其迁出或迁入时期。②发生量预报。预报害虫的发生数量或田间虫口密度。③分布区预报(包括迁移、扩散预报)。预报病虫的分布区域或发生面积；迁飞性害虫，预报其迁飞途径、方向和降落区域范围。靠气流传播的病虫，预报其传播方向、区域等。④危害程度预报和损失估计。在发生期、发生量预报的基础上，根据作物的生育情况等，预报危害的轻重或造成损失的大小。

按预报时效可分为：长期趋势预报、中期预报和短期预报。

①长期趋势预报。在病虫发生半年以前发出。长期害虫预报一般指预报2个世代以后的虫情动态，通常由年初展望全年，或对一些生活史长、周期性发生的害虫，分析在今后几年内的消长动态。长期病害预报一般指在作物生长季开始前或开始时，分析当年或翌年病害发生发展的情况。②中期预报。在病虫发生1～2个月前发出。中期害虫预报是根据害虫前一代的发生情况，推测下一代虫期的发生动态，指导防治措施。③短期预报。在病虫发生几天或十几天以前发出。短期虫害预报是根据害虫虫期的发生情况，推测后一个虫期的发生时期和数量；短期病害预报一般指作物生长期内病害发生发展和流行情况的预报，以确定防治措施与适宜时期。中、短期预报是根据长期趋势预报，结合当地观察情况进行校正后发出的预报。依据预报的性质，可分为通报、补报、警报及特殊报等。通报即一般预报。补报属补充性质的预报，一般在发出病虫通报之后，还要根据实际情况的变化，发出一次或几次补充预报，其目的在于进一步准确地提供预报和指导防治。警报属紧急性质的预报，即当所预报的病虫情况已达到防治指标时，要立即发出警报，及时开展防治工作。特殊报即对新发现的病虫害或对某些病虫在发生消长中出现异常现象时发布的预报。病虫气象预报的地区范围可以是一县、一地区、一省及整个病虫发生区。

(五)农用天气预报

针对农业生产需要而编发的天气预报，即从农业生产需要出发，依据天气学原理，采用现代预报技术和分析手段，分析、预测未来天气条件及其对农业生产的影响。如播种时期、收获时期及平时田间管理(施肥、喷洒农药)需要的天气预报，按预报时效分，短期(48 h)、中期(3～10天)、长期(1个月以上)、超长期(1年以上)预报。农用天气预报就其本质来说，虽然也是天气预报，但它不同于一般性的天气预报，它除了分析天气形势和有关的天气系统外，还具体考虑了当地当前农业生产对天气条件的要求。预报的项

目、内容比一般天气性预报明确、具体，便于农业生产直接使用。

此外，近几年来，农业气象工作者还在森林火险预报、渔业天气预报等方面开展了一些研究工作。

(六)森林火险预报

在林区防火季节，根据气象要素(温度、湿度、降水、风速等)、可燃物类型、火源等因素估测林火发生的可能性、着火时间、蔓延方向和速度的林业气象预报。主要内容有：①火灾危险天气预报。根据气象因子和森林火灾的定量关系，预报未来可能发生森林火灾的天气条件。②林火发生预报。根据气象因子变化与自然火源、人为火源出现的可能，预报林火的发生。③森林火灾行为预报。根据气象要素影响森林可燃物的干湿程度和林火特性，预报林火蔓延速度、林火强度和林火特性(地下火、地表火、树冠火等)，它有利于林区防火、灭火和林火管理等工作。

(七)渔业气象预报

针对渔业生产需要而编制的专业气象预报。它是渔情预报的一个方面，包括渔用天气预报和渔场水温预报 2 种。渔业气象预报可用来估量渔场渔业资源数量的变动情况，预测各渔场渔获量的变动；分析前期及未来气象条件对渔场的影响，及时制定渔船在整个渔场的数量，安排捕捞计划等。

(1)渔用天气预报　对渔船的捕捞作业天数、捕捞数量变动、渔船安全、水温预报和渔场变化等有重要意义。内容有：①大风。春汛和秋汛期间影响捕捞作业的大风日数和风向、风速、持续时间等。②寒潮。寒潮入侵时期、强度、降温、持续时间、路径及其入侵频率等。③海雾。春夏季海雾的出现日数、持续时间、分布海区等。④台风。台风出现时间、路径、强度、频率等。⑤季节提前或推迟、回冷或回暖等。

(2)渔场水温预报　它可用来判断渔汛期、鱼群集群与散群、渔场位置的偏移、渔场转移等因素的变化。内容有：①越冬渔场的

水温偏高或偏低;②影响洄游路线偏移的水温变化;③渔场范围内鱼类适温范围水温梯度的变化;④水温逐日变化的大小;⑤气象条件对水温的影响等。

第三节　农业气象情报、预报服务

农业气象情报、预报服务是农业气象科学的一个重要分支学科,是气象科学为农业生产服务的一种有效形式,是农业气象科研成果转化为生产力的重要手段和途径,也是获取社会效益和经济效益关键环节之一。随着农业生产的发展和科技水平的不断提高,各级政府、农业、经济、商贸及生产部门对农业气象情报、预报服务提出了越来越高的要求。广大农业气象科技工作者为了适应这种新形势的要求,不断地引进高新技术,进行广泛深入的研究、开发和业务服务实践,取得了良好的效果。同时,也培养了知识全面的高科技人才队伍,积累了丰富的经验,拓宽了服务领域,推动了农业气象情报、预报科学向深度和广度的发展。近 10 多年来,在中国气象局的组织领导下,以国家级农业气象情报、预报服务为龙头,形成了国家、省区市级等农业气象业务服务体系,建立了科学的服务流程和相应的服务决策系统,从而大大地提高了农业气象服务的质量,为各级政府领导宏观决策起到了重要的作用,在防灾减灾、促进国民经济的发展中取得了显著的社会效益和经济效益。

一、农业气象情报、预报服务的目的和任务

(一)农业气象情报、预报服务的目的

气候变化、气象条件是影响农业生产的重要自然环境之一。由于每年各地的气候特点、气象条件的差异,导致各种气象灾害的发生,对农业生产造成了不同程度的影响,因而决定了各地区年际

农业产量的波动。因此,农业生产不仅要与当地的气候条件相适应,还必须与当年的气象条件相适应。为了防御各种气象灾害,趋利避害,就要对过去不同时空尺度的气象条件对农业生产的影响进行科学的鉴定、分析和评价,并对未来农业气象问题进行长中短期预测。及时地进行农业气象情报、预报服务,可为各级政府和农业部门宏观决策、指挥农业生产提供科学依据;同时也为生产者科学地安排农业生产,因地制宜、积极有效地采取农业技术措施,充分利用有利的天气条件,避免或减轻不利的和灾害性天气条件的影响,夺取农业高产稳产提供了科学依据。

(二)农业气象情报、预报服务的任务

农业气象情报、预报是农业气象学的应用科学,是农业气象科研成果直接应用于农业生产服务的重要组成部分。其主要任务是:研究农业气象情报预报方法所依据的科学原理及方法,并紧密结合农业生产实际,客观、准确、及时地为各级政府部门宏观决策、社会公益事业和专业部门提供服务,以获得广泛的社会效益和经济效益。

二、国内外农业气象情报、预报服务的发展

农业气象情报、预报为各级政府宏观决策、指导农业生产及相关产业及时、客观、准确地提供大量的农业气象信息,为提高农业生产水平、促进国民经济发展做出了重要的贡献。因此,国内外的农业气象情报、预报服务普遍受到足够的重视。

据不完全统计,WMO 成员国中有近 70 个国家开展农业气象研究、情报业务服务,其中美国、前苏联、日本、加拿大、法国、德国、意大利等国家的服务水平较为先进。如美国发布的《天气与作物周报》的前身是《每周天气记事》,创办于 1872 年,其内容和范围不断地完善扩大,是美国乃至世界有一定声誉的气象与农业情报刊物。前苏联从 1922 年开始发布《农业气象旬报》。中国原中央气

象局于1958年编发《全国农业气象旬报》，部分省市也相继开展了相应的农业气象情报服务，1960年由于机构调整，《全国农业气象旬报》归并于《气象月报》，就此终断。随着社会的变革，国民经济和农业的迅速发展，各级政府和农业生产的需求，于1983年恢复了《农业气象旬(月)报》，同时推动了省区市及县市级普遍开展了此项工作，农业气象服务开始进入了新的发展阶段。

人类在长期的农业生产实践中，观测到寒暑风雨霜雪对农业生产的影响，总结和积累了许多农业气象预报的经验和知识。据古书记载，劳动人民很早就注意到农业耕耘与气象条件的关系和自然物候期变化的联系，进行了简易的播种、收获等农时活动和丰歉年景的预测估计。早在20世纪20年代，英国的Fisher R.A.(1924)用统计学方法应用于农业气象方面作了大量的基础性研究，为后来的农业气象统计预报方法的发展奠定了基础。30～50年代日本就对作物产量预报和冷害预测作了不少研究，分析了各地产量和气温、降水和日照的关系，并将各项要素进行组合，以建立作物产量气象预报方程，《日本作物气象研究》(大后美宝1945)就是这一时期的代表作。美国在1921～1922年为太平洋沿岸的水果种植区编制出霜冻预报；1926年开始做森林火险预报；而后逐步开展了农业气象预报服务。前苏联在40～50年代就物候期预报和土壤水分预报作了大量研究和试验，并编制了一系列的编制预报和开展预报服务的指导性规则。中国的农业气象预测报告发表在30年代末的《华北棉产汇报》上，题名为《本年度华北棉产第一次预想情况》。1945年涂长望撰文论述了作物产量预报的意义与方法途径。50年代中后期，开始试验作物发育期和土壤水分预报，并逐步开展各种预报服务。

进入60年代以后，随着计算机、卫星遥感等先进科学技术的发展和应用，在植物生理学和数理统计学进展的基础上，农业预报进入了一个新的客观化和定量化发展阶段，即统计动力(态)和

数值动力(态)模拟阶段。由简到繁地提出了大量的可直接应用于各种尺度的预报模拟模式,尤其是产量预报得到更广泛的发展,不少农业大国逐步开展业务应用。如美国、前苏联、日本、印度等每年向农业部门提供产量预报服务。美国的 LACIE 与 AGRISTARS 计划开始应用卫星遥感技术监测大面积作物长势,估算种植面积估测产量,监测和预测手段有了新的途径和发展。

中国的农业气象预报也有了进一步的发展。特别是进入 70 年代后,广大气象台站先后开展了作物播种、收获期以及各种针对性较强的农业气象的预报服务。国家级组织了全国范围内各种农业气象灾害预报和产量预报协作研究,建立了全国性的课题研究协作组,召开了各种学术讨论会和经验交流会,并汇编出版了《农业气象预报方法研究》(1980)和《农业气象预报文集》(1983)。此外,国家和省区市县还开展了作物预报试验,为各级政府和农业生产部门提供预测信息服务。

进入 80 年代以来,国家级和省区市级的农业气象预报工作取得了长足的发展,成为气象为农业生产服务的重要途径。不断地研制出了不同时空尺度的气候年景评价预测模型、各种农业气象灾害预测模型、作物物候期模型,大部分投入到业务服务中应用,获得了良好的效果。尤其是研制出作物生长发育和产量与天气条件相互关系的产量—天气气候模式,用于作物产量预报,进而建立了一个客观的业务应用作物生长发育监测、产量预报服务系统,具有大时空尺度,较为客观、准确,特别是可排除主观因素的影响。并及时投入到业务中应用,受到各级政府和农业生产以及国际粮食贸易部门的高度重视,取得了明显的服务效果,为宏观决策提供了科学依据,具有十分重要的现实意义和明显的社会经济效益。

目前,人类控制和改变天气气候条件对农业生产的影响依然十分有限,还没有达到足以抗御自然灾害尤其是大范围气象灾害的能力。因此,农业气象预报对农业可持续发展具有重要的作用。

三、农业气象情报、预报服务的组织和体系

(一)农业气象业务管理机构

中国的农业气象情报、预报服务业务至目前分为3级管理:中国气象局天气气候减灾司设有农业气象处,负责全国农业气象组织建设和业务管理,编制农业气象业务发展规划及年度计划,制定各种农业气象指南,指导国家级和各省区市气象局开展农业气象服务业务和进行业务管理;省区市气象局设有业务处,配有农业气象管理人员,负责本省区市的农业气象管理和业务服务的组织;地市气象局的业务科也配有农业气象管理人员,负责本地市的农业气象管理和业务服务的组织。

(二)农业气象业务体系

中国气象研究院农业气象和遥感应用研究中心(原农业气象研究中心)承担国家级农业气象情报、预报任务。此项业务在省区市级大部设在农业气象中心或农业气象卫星遥感信息中心、少数设在气象科学研究所。地市级气象局、县市级气象局都承担农业气象情报业务服务。于80年代中后期各级农业气象情报、预报已形成较为完整的业务服务体系。

此外,中国气象研究院农业气象和遥感应用研究中心承担超前性和基础理论性的研究,并开展了对农业生产有重大影响和促进农业可持续发展以及21世纪粮食安全问题等预研究的课题。省区市级气象科学研究所设有农业气象研究室,以应用研究为主。根据各级农业气象研究的需要,全国设60多个农业气象实验站,主要进行常规农业气象服务技术方法、农业气候资源分析方法等应用研究,以及农业气象实用技术与推广应用研究。多年来许多研究成果已转化到农业气象服务业务中应用,不断地促进农业气象情报、预报向深度和广度发展。

四、农业气象的监测、通讯系统

(一)监测网的布局和观测项目

国家级农业气象情报、预报服务系统是建立在国家、省级农业气象监测网的基础之上。国家级农业气象监测网站点，于1980年确定336个，1986年增加到546个，1990年扩大到587个，较为均匀合理地分布全国农牧区。各监测站点根据气候、土壤与作物的种植结构的特点，分别承担气象要素、作物生育期状况、土壤墒情、农业气象灾害等不同的农业气象的观测任务，组成各种专项监测网。其中农情监测站有406个，土壤墒情监测站有176个，主要分布在干旱和半干旱地区(东北、西北和华北地区)，南方(江淮、江汉和西南地区)仅有少数监测站点。全国省级监测网总共有700多个站点。各级监测站点的任务根据农业生产分布和需要组成不同区域的监测网络。

(二)农业气象监测方法

目前正在实施的《农业气象观测规范》，是中国气象局原气候司以1979年出版的《农业气象观测规范》和各地观测实验资料为基础，并根据国内外农业气象科研和业务的需求，通过试点和广泛征求专家意见，于1993年重新编写出版的。该规范分上、下2卷，上卷为作物分册、自然物候分册、畜牧分册；下卷为果树分册、林木分册、蔬菜分册、养殖渔业分册和补充篇农业小气候观测。

(三)监测信息的传输

国家级农业气象情报、预报监测站点是根据中国气象局统一制定的《地面气象规范》、《农业气象观测方法》和《气象旬(月)报电码(HD-03)》进行观测、编(AB)报和发报。全国各个监测站点所承担的任务是在每旬末同一时间进行一系列的观测、编报和发报。每个观测点按照规定的时间将报文发至省区市气象通讯台，再转至区域中心通讯台，然后发送到国家气象中心，再传输到中国气象

科学院农业气象和遥感应用研究中心。

(四)农业气象情报、预报(AB)报内容

国家级农业气象情报、预报(AB)报信息分为6段:第一段基本气象要素(气温、降水、日照、雨日、大风、暴雨日、积雪深度);第二段作物(发育期、生长状况、植株高度和密度、积温、土壤相对湿度);第三段灾情(灾害种类、受灾作物、发生时间、受灾程度及面积等);第四段地温(0,20,40,80,160,320 cm平均地温);第五段作物产量结构(穗粒重、千粒重、单产等);第六段补充(根据当地农业生产情况,若满足不了需要,可增加补充)。

作物物候监测网,主要监测小麦、水稻、玉米、棉花、大豆、油菜等粮棉油主要作物以及林、果、糖、牧草及经济作物。土壤湿度的监测网主要以北方旱地为主,有固定地段、非固定地段观测,有常年观测和季节性观测。另外,中国冬小麦气象卫星遥感动态监测与估产于1985年起步,确定了监测冬小麦遥感综合测产。

五、农业气象情报服务自动化系统的发展

农业气象信息加工处理自动化是农业气象情报现代化的基础。国家级农业气象情报服务于1989年初步建成自动化系统,其实现过程可分为4个发展阶段阶段。

第一阶段(1984～1985年) 实现电传机接收农业气象(AB)报文进入计算机处理。1985年设备更新,使电传机与计算机同时接收报文,明显地提高了报文的时效和质量。随之研制出电码转换DOS系统主控程序,为一系列提示菜单构成,可按提示调用子程序的任一部分内容予以显示、输出。另外,还分别建立了气象、农情、墒情、灾情等数据文件库,可提取数据、打印表格等。

第二阶段(1986～1987年) 解决了数据以图形方式输出、计算机与填图机自动填图的技术问题。

第三阶段(1988～1989年) 开发出地形网格子系统、图形分

析子系统,建立了初级阶段数据库。

(1)地形网格子系统、图形分析子系统 (AB)报文经转换系统和计算机通讯接口进入计算机内存,由译报系统采用灵活方便的数据文件结构,实现计算机自动填图、绘制等值线等各种图表,还可进行图形检索、翻阅、放大、剪接等,并在打印机和绘图机上输出。

(2)数据管理、加工子系统 该子系统具有数据管理、任意时段资料提取、加工处理等功能。

第四阶段(1990 年以来) 逐步向标准化、定量化发展。

更新了原有的系统,进一步完善了气象、农情、遥感、地学、社会经济统计等历史数据库、实时数据库;充分应用高科技信息技术。首先将农业气象服务 DOS 系统移植到 Microsoft Windows 环境下,在 ARC/INFO 平台上开发集农业气象、遥感应用于一体的业务运行系统;集成农业气象科研成果;充分应用地理信息系统 GIS 技术与遥感信息技术处理系统,开发出不同时空尺度的农业气候诊断分析、作物生长、灾害监测、产量预测、灾情收集处理评估、农业气候年景评估等业务服务系统。

省区市级与国家级农业气象业务服务现代化系统建设基本上同步发展,有许多省区市农业气象业务服务系统开发研究取得了重要的成果,还建立了区域农业气象业务服务系统,以区域气象中心数据通讯网络将各省区市系统连为一体。该系统以日常农业气象基本业务为基本内容,同时开发研制了农业气象情报自动解译绘图、农业气象灾害监测预警、农作物种植面积信息提取等子系统。

六、农业气象产量预报业务系统软件的研制与发展

在 1989 年之前,全国开展了大量的农业气象产量预报研究工作,取得了一系列的科研成果,为以后开展农业气象产量业务预报

奠定了基础。在1989～1991年期间，中国气象科学研究院原农业气象研究中心开展了国家级农业气象产量预报业务化试验研究，于1992年初步研制了国家级农业气象产量预报业务系统，在此期间，部分省份的气象业务部门也开展了产量预报业务工作，建立了相应的预测系统，但技术水平差异较大，系统化和业务化不够完善。为此1992年底中国气象局科教司下达了农业气象情报预报业务系统研制的研究课题，在国家级农业气象产量预报业务系统的基础上，利用在我国粮食产量综合预测方法研究中所取得的预测方法理论和模型，结合先进的计算机技术，充分考虑省级业务工作特点，研制了省级农业气象产量预报业务系统，为省级业务部门提供了有效的预报工具。经过多年的产量预报业务工作，国家级农业气象产量预报业务系统也不断地得到了完善和发展。随着全国产量预报业务的不断开展和深化，国家级与省级、省级与省级之间的信息交流更为频繁，大量的基本资料和业务产品需要共享，因此，对业务系统的系统化、规范化和标准化程度的要求越来越高，有必要形成从国家级到省、地市一整套完善的产量预报业务系统软件。90后代的中后期，国家级农业气象研究中心通过多年的不断发展，开发了从DOS平台到Windows 95/NT平台的多个不同版本的农业气象产量预报业务系统。目前，该系统已在全国大部分省、市气象部门得到了推广使用，不仅推动了省、市级产量预报业务的发展，而且也推动了全国农业气象情报预报业务的发展，取得了较好的业务成绩和社会、经济效益，为中国农业气象产量预报工作进一步走向自动化、规范化起到了促进作用。国家级产量预报业务系统作为中国气象局的业务服务窗口，还用于接待国内外宾客参观、访问，并且推向第三世界。

总之，通过近10年的产量预报实践，随着人们对产量预报理论和方法认识的提高，对信息技术应用能力的增强和计算机处理数据的能力的增强，产量预报工作得以不断深化，系统软件不断发

展，应用范围不断扩大，效益日益明显，逐步由国家级向省级融合，由单纯气象向多种社会、经济与气象因子综合，由中国推向世界。

七、农业气象情报、预报服务的主要对象

农业气象情报、预报服务是农业气象科技产品直接转化成社会生产力的重要手段，是提高农业气象为社会服务水平与获得经济效益的关键环节。目前各级农业气象情报预报服务大体上可分为2种类型：一类是无偿服务，即决策服务和公众服务；另一类是有偿服务，主要面向社会各种经济部门或实体的需要而开展的专业服务。近十几年来，中国各级农业气象情报预报业务的决策服务与公众服务取得了长足的进步和发展，服务领域不断拓宽，积累了丰富的经验，形成了较为完善的科学服务流程，并建立了较为先进的农业气象服务系统，从而大大地提高了服务质量，为各级政府领导部门宏观决策、指挥农业生产起到了重要的作用，得到了足够的重视，取得了良好的信誉，在农业防灾、减灾、抗灾、救灾及促进农业可持续发展等方面获得了广泛的社会效益和经济效益。

（一）农业气象情报、预报的决策服务

农业气象情报、预报决策服务是指为国家各级政府部门提供定期或不定期的农业气象信息，为各级领导宏观决策、指挥农业生产、防灾抗灾提供科学的依据和相应的建议及对策。国家级农业气象情报、预报服务所提供的决策服务内容，主要有农业气象旬报、月报、季报、年报，关键性、转折性、灾害性天气对农业生产造成的影响分析，主要粮棉油作物生长状况评价、产量趋势预报和定量预报等。各省区市级及以下气象部门为当地政府部门提供的服务基本上与国家级农业气象情报、预报服务相同。

（二）农业气象情报、预报的公众服务

农业气象情报、预报的公众服务是指通过新闻媒体向公众发布农业气象信息，目前仅提供农业气象情报服务。国家级农业气

象情报向新华社、中央电视台、广播电台、专业报纸定期发布“农业气象信息”，并开设“农业气象适用技术推广”、“农业气象知识”等专家讲座，省区市及以下气象部门为当地的公众服务基本上同国家级农业气象情报服务类似。

(三)农业气象情报、预报的专项服务

农业气象情报、预报专项服务是指除向用户提供所需要的常规情报预报外，还根据不同用户的专门需求提供各种农业气象信息。近10年来，各级农业气象情报、预报专业服务发展得相当快，已深入到与农业相关的各个部门。在做好常规农业气象情报预报服务的基础上，有针对性地开展农业生产相关部门需要的专业农业气象情报和预报服务。服务领域遍及农业生产、生产资料的供应、国际贸易、期货市场、粮食储备、农业保险等，促使了农业气象更广泛地为国民经济发展服务，从而获得了更大的经济效益，同时也促进自身的发展。

八、农业气象情报、预报编制方法

(一)农业气象情报、预报资料的收集及处理

国家级农业气象情报预报系统定时收集(AB)报，进行加工处理，绘图分析；并收集整理全国各省区市服务产品、卫星遥感资料以及有关农业信息，对综合信息结合天气气候条件进行加工处理分析，以便得出前期天气和农业气象条件对作物生长发育及对农业生产利弊影响的客观结论。为了使结论更直观、一目了然，还可以将经过加工处理的资料制成必要的图表。

(二)农业气象条件分析与鉴定评价

1.定期农业气象情报服务产品的原则

定期的农业气象情报有旬、月、季、年报，是以不同时间尺度的分析评价为主。编制各类农业气象情报，必须正确分析与鉴定前期的农业气象条件对农业生产的影响，这既是评价过去一段时间

气象条件对农业生产利弊影响程度的基础，也是正确地预报未来农业气象条件对农业生产的作用及提出建议和措施的依据。在分析鉴定时往往要运用农业气象指标、农业气象模型进行判别分析。首先总结评价该时期天气特点和农业气象条件对各种农作物生长发育的利弊影响；其次，评估各种灾害对农业生产造成的影响；最后，对下一时期天气气候条件进行展望，并指出对农业生产可能造成的利弊影响，提出生产建议及技术措施等。

2. 定期农业气象情报的内容和要求

(1)时段内天气、气候概况(降水、气温、日照等)。

(2)时段内农业生产概况(农情、墒情、灾情等)；农业气象条件对农业生产的影响鉴定和评价分析。

(3)根据当前与未来的天气、气候条件预报和农业气象条件对农业生产可能引起的问题，提出建议和应采取的有效措施。

(4)附主要气象要素、农情、墒情、灾害图表等(如降水、气温、日照、主要作物发育期、主要灾害、土壤相对湿度等)，部分资料也可列表，以更为具体。

(5)情报服务产品要求分析全面、细致，从单要素分析到综合分析；要有针对性的观点，结论要客观、明确，并提出可行性建议及措施；文字要流畅、精练，通俗易懂，符合逻辑。农业气象产量预报是各级政府制定粮食计划和农业生产决策所需要的重要经济信息，也是气象为农业服务的主要产品之一。全国产量预报业务服务的重是点是水稻、小麦、玉米、棉花和大豆及粮食总产的产量预报。省区市级除国家级指令性预报作物种类外，还可根据当地的需要自行确定预报的作物种类。农业气象产量预报一般分 3 次进行，即趋势预报、定量预报和订正预报。预报项目包括单产和总产。

3. 非定期农业气象情报的内容和要求

非定期农业气象情报是针对农业生产的关键季节、突出问题、

灾害性和转折性、主要作物生长的关键生育期,对相应的农业气象条件进行专项分析,所提供的专题农业气象情报服务产品。一般可分为作物专题分析、农业气象条件对作物生长发育影响分析、农业气象灾害评价等。非定期农业气象情报的主要特点是针对性强,内容具体,分析细致,重点为解决农业生产中的某一个问题进行服务。

4.农业气象预报的内容和要求

(1)预报结论表述要清楚,包括预报单产、总产数字或丰歉趋势;与上一年和历史最高年、近几年最低产量相比较的增减幅度;产量的地区分布概况。

(2)预报依据要充分,包括前期和未来气象条件对作物产量影响分析和预测;农情(如播种面积、气象卫星资料绿度值等)分析;农业病虫害和气象灾害发生情况;模式计算结果;社会、经济因素;旱作还要有土壤墒情分析。

(3)农业生产管理建议要对未来气候和天气进行预测,以弥补前期的预测不足,或提出防御未来不利气象条件应采取的措施或应重视的农业生产问题;提出充分利用未来有利的气象条件,力争夺取丰收的建议和措施。

(4)预报服务材料所用的资料要准确无误,所用图表、资料对解释预报结论或合理化建议能起到较大作用。

九、制定农业气象情报、预报的服务大纲

农业气象情报、预报的服务大纲必须根据当地各季农业生产的实际需要,为编制农业气象情报、预报产品和适时开展服务提供主要科学依据,所制定的年度服务大纲,又称“年度服务一览表”。服务大纲是在全面调查、总结农业气象科研成果的基础上,经过综合研究分析后编制而成。其内容是以时间(农事季节)为序列,系统地列出每个农业气候区的农业气象情报、预报服务要点。由于

农业的地域性、季节性气候的差异和作物种类的多样性等特点，国家级和各省区市以及县级农业气象情报、预报的计划都有一定的差别。但其主要内容一般包括各地气候背景、农业生产特点、各类作物发育期、适宜与不利的气象条件及可能发生的农业气象灾害、对粮食产量可能造成的影响，应采取的措施及农事活动等。

十、农业气象情报、预报服务的一般原则

为了使农业气象情报预报服务在宏观决策、安排和指导生产中发挥更大的作用，产生显著的社会效益和经济效益，在农业气象情报、预报服务工作中必须遵循一定的原则。

（一）抓住农事季节关键气象问题，积极主动、及时地服务

由于农业生产和天气条件都具有明显的地域性、季节性，所以各地农业生产实践中存在的关键气象问题差异较大，需要的农业气象情报、预报服务复杂多样。例如南方地区春秋季的低温连阴雨、夏季的高温伏旱，北方地区春季干旱、初夏的干热风和春秋季霜冻，东北的夏季低温冷害等都是影响当地高产稳产的一些关键性的气象问题。即使是同一地理纬度的地区，农业生产中关键气象问题也不尽相同，如沿海地区容易遭受台风的危害，山区容易遭受低温冷害的危害，内陆沿江、湖区容易遭受洪涝渍害的危害。因此，各地农业气象情报预报服务部门要从当地农业生产的实际情况出发，紧密围绕农业生产中存在的关键气象问题，积极、主动、及时地开展农业气象情报预报服务。积极、主动、及时即是把握住农时季节，不能往前赶，更不能后延，因为预报发布得过早，一方面会影响其准确性，另一方面各级政府、农业部门及生产用户还没有把问题提到议事日程上来考虑，不会引起足够的重视和采用；反之，预报发布得过晚，农时季节已到，则来不及采取有效措施而影响服务效果。例如，南方秋季“寒露风”预报，必须在双季晚稻播种以前发布，以便供农业部门、生产者调整晚稻品种及确定适宜的播种

期。

（二）要做到目的明确、任务具体

农业气象情报、预报服务的目的明确、任务具体，就是要根据农业生产实际的需要而确定服务项目和内容，必须明确回答农业生产中的某一个农业气象问题，便于生产上实际应用。如某种作物的适宜播种期预报，就要明确回答最适宜的农业气象条件下最佳播种时间，以便一播全苗，为丰收打下良好的基础。任务具体是指每一份农业气象预报必须根据农业生产的具体要求，逐项进行预报。因此，农业气象预报一般都按作物的种类、生育阶段、农时季节或某项田间农事活动需要进行预报。例如棉花适宜播种期预报，冬小麦成熟、收获期预报等。

（三）依据要充分，结论要准确

无论哪一种农业气象预报，都必须要有充分的科学依据，才能做出较为准确的预报结论。预报依据要充分是指得出的预报结论要有充分的依据，不能只根据某一种预报方法或某一个预报因子，也不能单凭主观判断，就轻易得出预报结论。在制作预报时必须充分运用农业气象监测和情报搜集到的资料，利用计算机进行加工处理，提取信息、选择预报因子，建立预报模型，并要对模型进行统计检验和试报检验，通过检验后才能在实际业务中使用。并要采用先进的预报方法和工具，要综合各种方法的预报结果。同时要不断地积累经验，进行大量的历史资料分析和研究，以及实地调查、进行各种形式的预报会商和讨论。尤其是产量预报还要注重分析经济政策、农业的投入以及种植结构的调整等，结合当年农业生产的特点，才能做出较准确的产量预报。

（四）农业气象指标要有农业生产实际意义

农业气象指标是表示农业生产中对某些气象条件所要求的气象要素临界值，它是表达农业气象条件特征的一种和几种综合的气象要素值。建立完善的农业气象指标评价系统对农业气象服务

工作极为重要，以指标为依据才能正确评价当地农业气象条件的利弊，才能研究当地的农业气候资源，才能揭示农业生产中存在的农业气象问题。

确定和使用有农业意义的农业气象指标，是农业气象情报和预报区别于一般气象情报和预报的重要标志。农业气象情报和预报服务要取得良好的效果，必须注重选用有明确农业意义的农业气象指标。反之，即使预报做得准确，也难以达到服务的目的，有时甚至还会给农业生产造成损失。例如，不考虑不同作物不同发育期抵抗霜冻能力的差异，而笼统地以最低温度0℃作为霜冻指标，并据此预报没有霜冻，而实况也确实没有出现0℃以下的低温，但生产者根据预报没有采取任何防御霜冻的措施，结果是刚刚移植的番茄幼苗全部冻死，造成严重的损失。这是因为以最低温度0℃的霜冻指标对番茄幼苗没有农业意义。实际上最低温度达4～5℃时番茄幼苗就要受冻。再如，若以0℃霜冻指标来预报秋白菜的霜冻，实况出现了－3℃的低温，而生产者根据霜冻预报，提前抢收了白菜，实际对于生产者造成了较大的损失。这是因为以最低温度0℃作霜冻指标对秋白菜是否提前收获是没有农业意义的。因此，选用合适的有农业意义的农业气象指标，一般是直接引用前人以前确定的指标或是根据试验研究和实地调查资料进行分析，求算出所需要的指标。但直接引用前人的农业气象指标也要针对不同地区进行验证，符合当地情况才能应用，切不可生搬硬套。此外，因为农业生产情况很复杂，受诸多因素影响，随着生产条件的逐步改善，农业科技水平的不断提高和品种的更新及耕种方式的改变等因素变化，农业气象指标也要发生相应的修正。如水稻陆地播种育秧温度指标以前为日平均气温低于12℃ 3天以上出现烂种、烂秧，但现在基本上采用薄膜保温育秧，日平均气温连续3天低于8℃时才会发生烂种、烂秧。而有些地区还推广工厂化育秧、旱育秧等新科技，由于耕种条件的改善、生产技术的更

新，早稻播种育秧抗御倒春寒的能力明显增强，甚至不存在烂种、烂秧的问题，如果现在仍仅用 12℃ 指标来鉴定或预报是否会对播种育秧造成危害就与农业生产的实际偏差较大。因此，在农业气象情报和预报服务中，随着农业生产科技水平的不断提高，要对农业气象指标进行新的研究和调查，指标验证确定后，方可使用，以达到为农业生产服务的良好效果。

（五）要研究农业气象条件的特点，掌握农业气象规律

农业气象情报和预报是为农业生产服务的专业性服务农业气象报道，编制报道的工作者必须深入研究农业气象条件的特点和掌握农业气象规律。例如，要编制东北地区作物低温冷害预报，首先要研究该地区多年来主要农业气象条件的特点，作物生长发育关键期低温冷害发生概率和规律、作物受害程度，低温冷害类型及其指标等。

另外，农业气象情报和预报服务内容不仅是针对过去、目前和未来农业气象条件与农业生产状况，而且还必须包括农时与农作物物候期鉴定分析，并要两者综合分析，根据合适的农业气象指标，进行鉴定、评价及展望或预报。例如编制江南双季晚稻寒露风预报时，一方面要预报晚稻抽穗开花期是否有低温过程，低温出现的日期、强度和持续时间；另一方面还要预报晚稻抽穗开花期的日期，是否与低温时间相遇。因为，晚稻抽穗开花期遇有低温才会引起颖花不育，导致空壳率增加而造成严重减产。而齐穗后出现低温，则危害程度就会明显减轻。所以，只有根据当地可能出现的低温情况和晚稻抽穗开花出现的时间进行综合分析，才能做出当年晚稻是否会遭受寒露风危害的预报。

（六）各级情报、预报要与不同地区范围、不同时效的服务相互结合

各级农业气象服务都有不同的服务对象和地区范围。目前，国家级的农业气象情报、预报服务主要是对全国大范围的主要农

业气象条件对农业生产的影响进行报道。而省区市级以下对一定范围的农业气象服务则更具体。所以,不但需要信息共享和服务产品相互交换,而且需要充分发挥各自的优势,上下级互相结合及补充,以助于提高服务质量及效益。

提供不同时效的农业气象预报,是由于预报的作用不同。如东北地区作物生长季的热量条件和霜冻预报,就要在春播前发布长期预报,供生产决策部门和生产者在选择作物品种、调整作物种植结构及采取栽培措施时参考。而在秋霜出现之前的中短期预报,则供生产决策部门和生产者采取促使作物早熟、防霜等措施时参考。另一方面中短期预报比长期预报的依据更充分,具有补充订正的作用,预报的准确性也会有所提高。

(七)生产建议针对性强,措施要有效地结合实际

农业气象服务报道中要根据当前和未来的农业气象条件,针对农业生产上的主要问题提出合理的建议,并要提出采取相应的农业技术措施。例如,由于冬季气候持续干暖,北方冬麦区失墒严重,对小麦返青生长将有一定的影响。应在小麦返青期开始预报未来降水的情况和土壤水分的状况,根据前期麦田墒情和预报结论提出要进一步加强管理的建议,并提出保墒、适时灌溉及灌溉量指标、合理施肥等措施。要使提出的建议和措施切合生产实际,就必须充分利用科研成果和进行农业生产实际调查,才能达到为农业生产服务的良好效果。

十一、农业气象情报、预报服务的方式

农业气象情报、预报服务方式随着信息技术的快速发展,由80年代较为单一地出版定期和不定期的农业气象情报、预报产品,基本上以信件方式传递产品、开展咨询服务,以电话、电报为主要通讯途径收集灾情,发展为90年代应用现代通讯手段如传真、电子邮件、互联网等,使资料、农业气象信息和产品更迅速、更有效

地提供给各级政府决策部门、社会新闻媒体及专业用户等终端。国家级农业气象情报、预报服务信息和产品与省区市级信息和产品通过全国气象情报、灾情收集处理及综合评估系统在互联网上交换。中国气象局开通了局域网，实现了资料、灾情监测、收集评估、服务产品等资源共享。另外，在互联网上还可以获取相关专业的大量信息和资料，充分体现了信息时代的特征，大大地提高了农业气象服务的时效性和服务产品质量，从而获得了更加显著的社会效益和经济效益。

第七章　农业气象观测及研究方法

第一节　农业气象仪器及观测方法

一、概述

利用检测装置对农业生物环境中的气象要素进行定量测试的作业过程称为“农业气象观测”，实现检测作业的仪器仪表称为“农业气象仪器”。农业气象观测活动是科学研究的基础、生产管理的根据。针对大范围的农业气候问题，人们主要利用来自国家气象台站以及农业气象试验站、观测站等的气候观测资料进行研究。作物气象、畜牧气象、农田小气候、设施气象等小气候方面的研究，除了定点气候观测资料之外，还需要大量的巡回流动式小气候观测。

20 世纪 70 年代以后，随着科学技术的进步，农业气象观测仪器有了很大进展，较先进的产品如：净辐射表、地中热流板、中子土壤水分测定仪、红外 CO_2 气体分析仪、气孔仪和多路遥测自动气象站等的应用，拓展了小气候观测的广度，提高了观测的精度，有力地推动了诸如农田辐射平衡、热量平衡、水分平衡、光能转换及利用等方面小气候理论的深入发展。

二、农业气象仪器仪表

(一)单要素观测仪器

属于这一类的仪器有：太阳辐射观测仪、温度测量仪、湿度测量仪、土壤水分测量仪、CO_2 测定仪等。主要由传感器及二次仪表

组成，用以观测单要素气象因子。

(二)多要素综合观测仪

属于这一类的仪器有：微气象数据记录仪(microrecorder)、自动气象站(automatic weather station)，以及带传感器的数据采集器(data logger)等。采用专用单片机芯片(microcontroller)，配备传感器接口、直流放大器、多路开关、模数转换器、采样保持器等部件，完成多路(通常8～256路)数据采集、数码显示、记录存储及资料预处理等功能，还可以通过互联网，实现统计分析、数据库原始资料的自动录入等作业。

三、农田小气候观测方法

农田小气候观测主要目的是探索植物群体与贴地层气象条件之间，相互影响、相互作用的数量关系。植物群体结构在作物的某个生育期中，以及在相似的天气条件下具有相对稳定性。可选择典型生育期、典型天气进行为期几天的短期观测。在农田中进行观测，必须维护群体结构原有的自然状态，才能够保证观测资料的真实性。

(一)观测地段

所选观测地段要能代表实际的农田状况，包括土壤质地、地形、地势、农田管理措施、作物生育状况等。设对比观测的项目需选择对照地段。作物群体是一个空间结构，同一块大田的不同部位，冠层空间结构不完全相同。因此，测点选定不仅要真实，而且要有代表性。大田状况比较复杂或作物均匀性较差条件下，更要妥善考虑测点的数目及测点在田块中的平面布置和立面布置。

(二)观测时间

除定位观测外，一般只在关键生育阶段选择3～5天典型天气进行观测。为测定某些要素的日变化规律，例如冠层内外辐照度、光合与呼吸强度、蒸腾速率、甲烷(CH_4)排放日变化等，至少每

小时观测1次。有的要素日变化不剧烈(如地温)，则可每6 h观测1次。如果有些要素白天变化大，夜间变化小，例如研究光照、温度、CO_2浓度与光合作用强度的关系，也可以只在白天观测，夜间停止观测或根据情况增减全天观测次数。原则上要尽可能有几次观测时刻与国家气象站地面气象观测的时刻一致，便于和大气候对比。

设施小气候观测时刻根据生产和实验的要求而定。目前国际上规模较大的制造温室环境控制计算机的公司推出的产品，温湿度的自动记录按每分钟1次的间隔进行。具体分析或评价环境状况时，根据管理者的要求向计算机输入不同的指令，设定所需要的时间间隔(分钟、小时或以日为单位等)。

(三)观测部位及高度

观测部位的选定根据研究目的、对象，结合植物学形态及器官部位决定。例如研究某作物花粉管萌发最适温度，观测部位应最贴近花器官。观测高度根据植物类型、近地面层气象要素的垂直分布特征、冠层的高度、枝叶茂密程度等情况来定。如测空气温湿度的梯度变化，裸露农田在无风条件下，温、湿度随高度按指数规律变化，贴地气层的梯度变化大，间距应小些；测小麦、谷子等作物群体，应选择20 cm，150 cm和代表作物活动面的2/3株高；测玉米，由于植株比较高大，可选50 cm，3 m和代表作物活动面的2/3株高；林粮间作田中的观测，根据树种、树冠高度、林木行距、株距、间套作物密度、高度等具体决定。

第二节　农业气象统计分析法

一、概述

农业气象统计分析是概率论和统计学在农业气象领域的拓展

应用，目的在于分析农业气象要素与农业生物之间的作用规律及量化关系。20 世纪 30 年代，费雪首先把数理统计分析方法应用到田间实验中。随后的 20 多年里，应用数理统计方法，分析研究气象环境与生物之间相互关系及统计规律的文献屡见报道。20 世纪 50 年代，随着中国农业气象学科的创建和发展，农业气象统计分析方法逐渐形成体系并日趋完善。

农业气象统计分析的主要内容，包括一系列对农业气象实验观测数据资料的加工、整理、描述、分析和推论的方法。农业生态气象环境在众多因素的影响下，呈现出复杂性和多变性。采用农业气象统计分析方法，可以发掘出隐藏在数据之中的系统因素的作用，揭示事物发展规律，进而运用这些数量规律进行分析、推论、解释现状并预测未来。

农业气象统计分析的基础是数据资料。资料来源包括国家和各级气象部门、统计部门向社会公开发表的公报、年鉴、月报、年报等气象及农业统计报表，以及农田小气候调查、实验室的分析记录和观测数据。数据资料根据完整性来划分，可分为总体资料和样本资料 2 类。具有共同性质的个体组成的群体或集团称为“总体”。总体资料是通过对群体的逐一列举和全面观测获得的资料，反映总体的全貌。样本资料是从总体中随机抽取一部分，形成的有限个体数据集，可以根据样本来推断总体的内容。样本个体数≥30 称为“大样本”，＜30 的称为“小样本”。

二、随机变量及概率

随机变量是一组受偶然因素影响而变异的观测值的总称。随机事件指在相同条件下可能发生，也可能不发生的事件，但在大量重复试验中，随机事件发生的概率几乎是确定的。概率是用来表示随机事件发生的可能性大小的一个量。随机变量的取值在实验前无法确定，但是对于每一次具体的观测或试验它的取值又是

确定的。

(一)离散型随机变量

如果一个随机变量的所有可能取值为有限个,并能够一一列举出来,就称这种随机变量为离散型随机变量。离散型随机变量每一个可能的特定值有确定的概率与之相对应。必然不会出现的事件概率为0;必然会出现的事件概率为1,概率的取值非0则1。离散型随机变量概率分布的类型有泊松分布、二项分布等。二项分布是离散型随机变量最常用的概率分布。

以验证种子是否发芽事件为例。若每次播种1粒进行发芽试验,每一次都有2种结果:即"出芽"或"不出芽",且每粒试验的结果相互独立。设出芽记作事件A,出现的概率为p,记作$P(A)=p$,不出芽的概率为$q=1-p$。用二项分布描述在n次试验中出现m次的概率分布可表示为:

$$\mathrm{P}\{X = m\} = C_n^m p^m q^{n-m}$$

$$m = 0,1,2,3,\ldots n, \quad 0 < p > 1, \quad q = 1 - p$$

C_n^m 为 n 中取 m 的组合数,$C_n^m = n!/(n-m)!\ m!$

且规定 C_n^0 及 $C_n^n = 1$

例如:杂交玉米种子发芽率为80%,计划在田间穴播,问每穴至少应播种几粒,才能保证缺苗穴占田间总穴数的比例小于1×10^{-4}?

已知种子发芽率$p=0.8$,$q=1-0.8=0.2$,设每穴播下n粒,其中m粒全都不发芽的概率应为:

$$C_n^0(0.8)^m(0.2)^{n-m} = 1\times(0.8)^0\times(0.2)^{n-0}$$

当n取值1,2,3,4,5,6时,$C_n{}^0$相应为:0.2,0.04,0.008,0.001 6,0.000 32,0.000 064。可见播种6粒,而6粒全都不发芽的概率为0.000 064,已低于1×10^{-4}的概率。

(二)连续型随机变量

如果随机变量的可能取值充满所讨论的整个区间,而不能一一列举,则称这种随机变量为连续型随机变量。连续型随机变量对于每一个试验的结果,在某一区间上有着确定的概率。如果函数 $f(x)$的曲线与 x 轴围成的面积等于 1,则称 $f(x)$为连续型随机变量 X 的概率密度。

正态分布是连续型随机变量中最重要的分布,大量的随机现象符合正态分布。符合正态分布的随机变量 X 的概率密度为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

若以图形来表示，其概率密度分布曲线呈向下开口的钟形，顶点在 $x=\mu$ 处,曲线的陡缓程度取决于 σ。μ 和 σ 表征随机变量 X 所有元素的集中趋势和分散程度。μ 称为随机变量 X 的数学期望。

χ^2分布和 t 分布也是描述连续型随机变量的 2 种重要分布。前者用于适合性检验与独立性检验,后者在处理小样本中用途极广。随样本数 n 的增大,两者都以正态分布为其极限。

三、统计分析的主要应用

(一)单变量集中性和分散性的表述

1. 平均数

连续性随机变量的平均值代表 1 组观测数据的集中趋势,反映该组数据资料的大多数水平。平均值包括算术平均值、几何平均值、中位数、众数等。算术平均值是表示数据集中趋势的最常用测度值。例如：日、候、旬、月、年平均温度；植株高度、每 667 m^2 (1 亩)平均茎数、每穗平均粒数等。依据平均值的大小可以分析气象要素在时间和空间上的变化、农业生物的群体生育消长规律，等等。

算术平均值的计算　一组观测数列的算术平均数采用从第1个单位数据，一直到第 n 个单位数据的累计求和，然后再除以总的观测单位数 n。

算术平均值　　$\overline{X}=(\sum X_i)/n$

2. 离散度

描述观测数据的离散程度，通常用离差、平方和、方差、变异系数、标准差等表示。

离差(或距平)　数列中的每个观测数据与平均数的差值，在农业生物统计学中称"离差"；在气候学上则称"距平"。离差表示个体数与平均数之间的偏差的大小。计算平均数时，取每一个单位数据的离差的绝对值，然后相加求和，再除以观测总数。在农业生物性状的统计中，绝大多数是抽样调查。若观测总数为小样本，采用 $n-1$ 代替观测总数。

平方和 L　平方和的概念和计算方法在相关、回归、方差分析中占重要地位，它的计算方法是对群体内每一个数据的离差分别平方，再进行累加求和，得出累积数值。即：

$$L=\sum(X_i-\overline{X})^2 \qquad (i=1,\ 2,3,\ldots n)$$

式中　$\sum$为累加求和记号；X_i代表组内从第1个单位数据一直到第 n 个单位数据；$\overline{X}$ 为算术平均值。

方差 S^2　平方和的平均数就是方差。方差计算公式为：

$$S^2=\frac{\sum(X_i-\overline{X})^2}{n-1}$$

式中　n为总的观测单位数；$\overline{X}$ 为样本平均值。

$n-1$ 称为自由度，因为当样本平均值 $\overline{X}$ 确定后，样本 n 个数据中，只有 $n-1$ 个数据可以自由变动，即样本数据中只含 $n-1$ 个误差的有用信息。为保证样本方差 S^2对总体方差进行估计偏差性最小，样本方差应除以 $n-1$(自由度)，而不是总的观测单位

数 n。

标准差 $S(SD,SD)$　标准差 S 是方差的平方根，即

$$S = \sqrt{S^2}$$

变异系数 V　变异系数指标准差与平均值的比值。2 个或更多的单变量进行比较时，由于每组单变量的平均值不同，不能简单比较各组数据的方差。应分别计算 2 组数据的变异系数再进行比较。

$$V = S/\bar{X}$$

（二）测度不同事物之间的关联性

为探索农业生物与气象环境条件之间的相互关联，常用相关统计分析方法。相关分析只解决两因素间有无关联及其疏密程度。两个因素之间的关联称为“简单相关”。分析两个以上变量间有无关系以及关系的密切程度要使用偏相关分析法。

1. 线性相关系数 r

若两个因素间存在简单的比例关系时，称这种关系为“线性相关”（或简单相关）。设观测数列 X 与观测数列 Y 包含的单位数据各有 n 个，$\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别是这 2 个数列的平均值，则相关系数等于以 X 的离差和 Y 的离差乘积的累加值为分子，以 X, Y 两离差平方和乘积的平方根为分母构成的比值 r，即：

$$r = \frac{L_{XY}}{\sqrt{L_{XX} L_{YY}}}$$

式中　$L_{XX} = \sum(X_i - \bar{X})^2$，表示 X 的离差平方和；

$L_{YY} = \sum(Y_i - \bar{Y})^2$，表示 Y 的离差平方和；

$L_{XY} = \sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$ 为 X 的离差和 Y 的离差乘积之和。

2. 相关系数的意义

相关系数 r 可以度量变量 Y 和 X 线性关系密切程度。r 的

取值在 $-1 \leqslant r \leqslant 1$ 之间。若 $r=0$，表明 X 和 Y 之间没有相关。若 X 值增大时 Y 值也趋于增大，表明 X 和 Y 之间为正相关，$0<r<1$；若 X 值减小时 Y 值也趋于减小，表明 X 和 Y 之间为负相关，$-1<r<0$；若 $r=1$ 或 $r=-1$，表明变量 Y 与 X 为完全正相关或完全负相关。完全正相关或完全负相关时，X，Y 两个变量之间是单值对应的函数关系。r 值表明变量间线性关系的强弱，一般情况下，$r \geqslant 0.8$，称为高度相关；$0.5 \leqslant r < 0.8$ 称为中度相关；$0.3 \leqslant r < 0.5$，称为低度相关。

3.相关系数的显著性检验

农业气象统计分析中，多以样本相关系数代表总体相关系数。大样本数据通常采用 t 检验来检验 r 的显著性。若 r 在统计上是显著的，就证明两个变量间存在线性关系。t 检验方法的第一步是计算相关系数 r 的 t 值，采用以下公式：

$$t = | r \sqrt{n-2} | / \sqrt{1-r^2}$$

然后根据给定的显著性水平(通常采用 $\alpha=0.01$)和自由度($n-2$)查 t 分布表找到相应的临界值。若计算值大于临界值，表明 r 在统计上是显著的，否则表明 r 在统计上是不显著的。

（三）探查变量之间的因果关系

变量间的因果关系用回归分析来探查。回归是一种统计的平均函数关系。回归分析目的在于查明因变量是如何随自变量变化的。通过对因变量的变化趋势与大致的增量进行回归分析和估算，可以实现预测和控制之目的。例如，利用当年旱地小麦产量与前一年夏季降水总量调查数据，找出底墒与产量之间的因果关系。

1. 线性回归方程的建立

一元回归研究两个变量间的相互关系。假若两个变量之间是线性关系，建立一元线性回归系数通常采用最小二乘法。这种方法由于用到二次方的统计运算法则，故称“最小二乘法”。

设一元回归的一般表达式为：

$$Y = b_0 + b_1 X$$

式中　b_0 为截距，表示当 $X=0$ 时，Y 的期望值；b_1 为样本回归系数，表示当 X 变动一个单位时，Y 的平均变动数值。

利用上式计算得到的回归值估计值，往往并不与观测值 Y 相等，两者间的偏差称做“残差”，残差可为正数，也可为负数。观测值与回归值的偏离程度，用全部实际观测值与回归估算值的离差平方和来表示。

最小二乘法确定的 b_0，b_1值能够保证估测值与实测值之间的偏差平方和最小。计算公式如下：

$$b_1 = L_{xy}/L_{xx}, \qquad b_0 = \bar{Y} - b_1\bar{X}$$

式中　$\bar{Y}$，$\bar{X}$ 分别表示因变量 Y 的平均值和自变量 X 的平均值；L_{xx}表示 X 的离差平方和；L_{xy}表示 X 的离差和 Y 的离差乘积之和。

2．直线回归方程的检验

（1）检验回归系数　检验自变量 X 与因变量 Y 之间是否真正存在线性关系。样本回归系数 b_1 是度量当 X 变动 1 个单位时，Y 的平均变动数量。回归系数 b_1值越大，线性关系越明显。如果回归系数 $b_1=0$，回归直线就是一条水平线，表明 X 与 Y 间无线性关系。

（2）检验拟合程度　也就是检验因变量各观测数据点聚在回归直线周围的密集程度。这种程度用离差的平方和 L_{yy}表示。离差平方和 L_{yy}可以分解为两部分：一是回归值估计值与均值 $\bar{Y}$ 的离差平方和，称为“回归平方和”(U)，它反映由 X 与 Y 的线性关系引起的变化。

$$U = b\,L_{xy}$$

另一部分称为“剩余平方和”(Q)，包括了偶然因素、未知因素等的

影响。

$$Q = L_{yy} - b_1 L_{xy}$$

总的离差平方和 L_{yy}、回归平方和 U、剩余平方和 Q 三者关系如下：

$$L_{yy} = U + Q$$

U 在总平方和 L_{yy} 中所占比例愈大，则回归效果愈优；依据回归平方和 U 在总平方和中的比例，可以检验回归效果的优劣。这个比值经过推导和变换，等于相关系数的平方。因此，可以根据相关系数判断回归效果的好坏。相关系数的绝对值愈大，回归平方和 U 也愈大，剩余平方和 Q 就愈小，回归效果愈优。

(3)检验方程的显著性　变量 X 与 Y 之间是否存在线性关系，还可用方差分析法进行检验判定，这就是回归方程的显著性检验，也叫 F 检验。这里要用到均方的概念，平方和除以自由度称做“均方”(或称“方差”)。假设回归方程是不显著的，即回归系数为 0，则回归的均方与剩余的均方之比定义为回归方程的统计量 F：

$$F = \frac{U}{Q/(n-2)}$$

根据自由度查 F 分布表，得出相应显著标准的 F_α 值，若 $F > F_\alpha$，则回归效果达到显著性的标准。否则，回归效果不显著。F_α 通常取 0.05 或 0.01。

3. 多元线性回归

当影响因变量变化的因素多于 1 个时，需要用多元回归分析法，把 2 个或多个自变量各自的影响分别估计在内。设影响因变量 Y 的自变量有 k 个，且假定因变量 Y 与 $X_1, X_2, \ldots, X_k$ 之间存在线性关系，则以下表达式

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \ldots + b_kX_k$$

表示 Y 与 X_k 之间的多元线性回归方程。

式中的 b_1, b_2, b_k 是采用最小二乘法建立起来的偏回归系数。表示当其他自变量保持不变时，自变量 X_1 或 $X_2, \ldots$ 或 X_k 单独变动 1 个单位导致因变量 Y 的平均变动数值。检验多元线性回归方程的显著性，通常采用 F 检验法。

4. 逐步回归

线性回归方程的显著并不表示每个自变量单独对因变量的影响都显著。还应进行逐级筛选，在线性回归方程中保留有重要影响的因素，剔除那些作用不显著的、次要的变量。为此，需要对每个变量进行考察。这种逐级筛选的方法称为“逐步回归”。

(四)探索变量在时间域上的变化规律

针对气象或农业生物发展的时间趋势、循环波动和不规则变动等周期及非周期性变化，通过时间域上的分析，找出事物在某一时段内消长、演变、积累和发展变化的长期趋势。

1. 滑动平均法

滑动平均法对时间数列按事先确定的项数，采用逐项移动的办法，一定时期分别求算平均数，形成一个新时间数列。在新的时间数列中，短期的偶然因素引起的不规则变动被平滑过滤，突出了带有规律性的波动，呈现出数列在较长时间内的基本发展趋势。可用于分离产量的时间趋势项，便于单独估测气象因素对增产的贡献。在农业气候统计方面，5 日滑动平均法，被中国国家气象局指定为各气象台站计算界限温度起止日期的统一方法。

以某地初春气温逐日回升的数据为例，采用 5 日滑动平均法(表 7-1)。第一步将 7.4，3.3，-0.9，-1.3，-0.8 这 5 天的温度数据相加求平均，得出新的时间数列第一个数值 1.54；然后将 3.3，-0.9，-1.3，-0.8，-5.1 相加求平均，得出新数列第 2 个数值 1.08，...以此类推。可见在原日平均温度数列中，存在着由第 1 个数 7.4 到第 6 个数 -5.1 的剧烈波动，而在新数列中则被平滑修匀，呈现出更好的温度上升趋势。

表 7-1 日平均气温的 5 日滑动平均值

日平均气温(℃)	7.4	3.3	-0.9	-1.3	-0.8	-5.1	6.0	7.5	5.9	4.0	6.8
5 日滑动平均			1.54	1.08	1.62	3.3	4.74	5.7	6.04	5.92	5.86
日平均气温	5.4	7.2	11.0	8.6	10.8	9.8	10.6	8.13	7.8	8.6	8.2
五日滑动平均	6.88	7.8	8.6	9.48	10.16	9.62	9.46	9.02	8.7		

2.最小二乘法

最小二乘法求得某个要素随时间变化的回归方程,可以用作测定时间序列的长期趋势。应用这种方法测定长期趋势时,首先确定以时间为自变量 X,随时间而变动的量为因变量 Y。描绘出数列 Y 的数据随 X 变动的趋势线,选择拟合方程的形式。若存在直线趋势时,其趋势线方程的一般形式为 $Y_i = a + bX_i$,可参照直线回归的统计方法求算。

3.谐波分析

谐波分析又称"傅里叶分析"。其原理是以 1 组周期数据或时间相关数据为基础,进行傅里叶分析,计算傅里叶系数。然后从傅里叶数出发,通过计算得到对应于原数据的一个转换数据集。此法曾用于物理学上对电脉冲方波的描述,把距形波看做是由许多简单函数,例如正弦、余弦三角函数叠加而成的。其最长周期为距形波的波长,称为"基波",其余波长为基本波长的 1/2, 1/3, 1/4, ..., $1/n$(n 是正整数),称为"谐波"。

应用傅里叶转换原理,针对农业气象周期函数进行时间序列分析,可以模拟呈周期变化现象的时空规律。在气候上应用较多的是用于比较各地区、各气候要素的年变化、日变化规律以及超短期的序列订正方法等。

用来描述周期性分布规律的傅里叶公式如下：

$$Yi(t) = A_0 + \sum_{n-1}^{\infty}[a_n \cos(n\omega ti) + b_n \sin(n\omega ti)]$$

式中　t_i 代表任意时刻；a_n，b_n 为傅里叶系数，其中 $a_n = (2/T) \cdot \sum Y_i(t) \cos(n\omega t_i)$，$bn = (2/T) \cdot \sum Y_i(t) \cos(n\omega t_i)$，$\omega = 2\pi/T$（$T$ 为周期长度）；A_0 为原数列的算术平均数；$Y_i(t)$ 为相对应于 ti 时刻的新数列函数值。

例：北京地区 1961～1980 年逐月平均温度如表 7－2。

表 7.2　北京地区逐月平均温度实况及谐波分析估算值

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
温度(℃)	-4.6	-2.2	4.5	13.1	19.8	24.0	25.8	24.4	19.4	12.4	4.1	-2.7
Y_i	-4.9	-2.1	4.7	12.8	19.8	24.2	25.7	24.2	19.6	12.3	4.1	-2.7

各项系数计算结果如下：

$A_0 = 11.5$

基波 T 的傅里叶系数　$a_1 = -15.31$　$b_1 = 0.2405$

谐波 $T/2$ 的傅里叶系数　$a_2 = -1.075$ $b_n = 0.1299$

拟合的统计模式为：

$$Y_i(t) = 11.5 - 15.31 \cos(n\omega t_i) + 0.2405 \sin(n\omega t_i) - 1.075 \cos(n\omega t_i) + 0.1299 \sin(n\omega t_i)$$

表 7－2 中第 2 行 Y_i 值，是根据傅里叶统计模式，只取 $T/2$ 谐波求得的计算值。

四、农业气象统计分析的微机处理方法

（一）统计软件编程语言的选择

电子计算机是处理大批数据资料，实现统计分析计算过程的有效工具。微型电子计算机的发展，在 1978～1998 年短短的 20 年间，硬件方面经历了从 64K 内部存储器的 Inter 8080 PC 机到高效率信息处理功能的"奔腾Ⅲ"型机。随着微型机的迅猛发展势头，统计分析软件也从 GWBASIC 编写的程序段，到完全图形化界面的统计分析系统，经历了由低级到高级的发展阶段。

进行统计分析或其他科学计算工作，必须解决人机之间的语言沟通问题。计算机并不能识别人们使用的自然语言，只能接受和执行二进制的指令，即机器语言。利用机器语言编制数学解题运算程序，艰难复杂又耗费巨大。20 世纪 50 年代以后相继出现了面向过程的算法语言 FORTRAN, COBOL, ALGOL, BASIC 等高级语言。这些语言的共同特点是用接近自然语言和数学公式的语句来表示算法。每种语言都提供专用语法规则和书写格式。例如，BASIC 语言用"PRINT A + B·X + C·X·X"表示"运算并打印 $A+BX+CX^2$的值"。虽然计算机不能直接执行算法语言程序，但算法语言具备的编译程序或翻译程序，能够译成机器可识别的二进制目标代码。面向过程的算法语言都属于高级语言。高级语言的出现，使非计算机专业的科研人员和广大学者，能方便地使用计算机语言编写程序，解决面临的统计分析及科学计算问题。

使用面向过程的算法语言编程序，必须对每个步骤都详尽写出执行过程。要求程序设计时考虑得十分周到，弄错一个变量标识符，就会导致整个程序运行失败。因而出现了非过程化语言，不需要编出具体执行过程中的每一个细节。诸如变量类型的设定、数组的定义、子程序的钳套、循环赋值次数、流程的转向判断等属于编制程序技术细节，都由计算机自行解决。进行统计分析时只需下达任务，给出原始数据，指明要做的统计项目名称，而不必具体指出如何做的全过程。20 世纪 80 年代，研制出的 FORTH 语言、DBASE 小型数据库语言、SAS 统计分析语言等都

是非过程化语言。例如:SAS 语言“PROC MEANS NOPRINT”的这一语句表示:“计算观察值数、平均值、标准差，但不打印结果。”可见，非过程化语言的出现，为更方便地使用计算机创造了极有利的条件。

(二)统计分析软件发展概况

统计分析主要涉及数值运算，数值运算发展较早，也比较成熟。国外统计分析软件的发展始自 20 世纪 60 年代。1966 年美国北卡罗来纳州的一些科技人员着手研究适用于主体机(main frame)的统计分析程序。1977 年 SAS(statistical analysis system)研究所成立。20 世纪 80 年代,随着 PC 机型的普及，中国国内出版物上出现了关于统计分析的 BASIC 或 FORTRAN 高级语言算法程序的介绍。当时针对各类统计计算问题都有现成的程序可供选阅,但并未形成系统产品。1985 年 8 月份,美国 ADC 组织将 North West Analytical Inc. 公司研制适合 IBM PC 微型计算机使用的统计分析软件包 STATPAK 介绍到中国。STATPAK 软件包全部用 BASIC 语言编写,共有 58 个程序模块。该软件包通用性较强，与其他常用微机软件，如 Wordstar，Lorus - 1 - 2 - 3，DBASEⅢ等有较好的数据转换接口。1986 年联合国粮农组织与中国农牧渔业部技术交流合作项目中,曾作为重点教材。

为适应微型机及 PC DOS 操作系统的发展，SAS 研究所 1985 ~1988 年先后推出 SAS/PC 6.03 和 6.04 版本；1996 年推出 Windows 环境下的 SAS 6.11 版本。在这一时期内,国际流行的商业化软件还有 SPSS, BMDD, SYSTAT, MINITAB 等,但使用面都不及 SAS 广泛。有关目前最新 SAS 资源，可以通过 Internet 国际互联网，获取 SAS 研究所的 WWW 主页。域名为: http://www.sas.com。

(三)实现统计微机化的途径

统计分析计算机化可以通过以下 4 种途径实现:

1. 算法语言编程

统计分析偏重数值计算，使用最多的微机算法语言主要有 BASIC 及 FORTRAN 。在 DOS 环境下 Microsoft Quck BASIC V4.5，MS－BASIC V7.0 以及 MS－FORTRAN V5.1 是较常用版本。编制统计分析程序，首先应遵守所用高级语言的一整套特定的规则，如基本符号、格式、变量类型、标准函数、模块、子程序和过程等。其次应熟悉农业气象统计分析的算法原理，从中选用比较适宜编写的表达式。

目前出于统计分析的目的，用算法语言编写程序，替代袖珍计算器或算盘来求解统计运算问题的做法已相当少见。仅在设计某些分析管理软件或设施小气候检测控制软件作业中，需要用到统计过程时，利用算法语言编写相应的程序段或模块，供主程序调用。

2. 使用统计分析软件包

统计分析软件包是一种捆绑式的专用程序集，以某种算法语言为母语，不具备独立的编程语言。由统一的引导程序启动，通过各级菜单，进入所选择的模块。使用标准化提示，进行人机交互作业，实现原始数据及运算参数的读入，一般具有统一的格式化输出。统计分析软件包的内核是一系列统计分析模块。主要模块有概率计算、单变量计算、分布函数、回归与相关、平均数检验、χ^2分析、方差分析等。除内核以外，配有启动程序、菜单程序、文件管理、模块调度、通用接口程序等外围服务程序。不需了解算法语言编制程序的知识，只要弄懂软件包的技术指标、运行环境、操作使用方法，就可以通过人机对话和提示进行统计分析作业。

统计分析软件包的出现，使人对程序的理解和干预减少到最低限度。但是软件包缺乏灵活机动性，程序组只能遵照一种固定模式运行，输入输出格式呆板。以 STATPAK 统计分析软件包为例，数据输入只能通过磁盘文件；数据输出格式也不能根据需要

加以改变。

3. 使用统计分析系统

专门化的统计分析系统一方面具备由模块组成的程序包；另一方面具有自己的非过程化语言系统。各模块之间相互独立，但可通过系统管理程序统一调度，而模块又可以化分为若干彼此独立的、可灵活调用的过程或子程序。以 SAS 系统为例，它的统计分析功能包含在 SAS/STAT 模块的 30 个过程中。主要功能包括回归分析、方差分析、聚类分析、多元分析、判别分析、属性数据分析等。用户通过编制简短的程序，就可以实现所需的功能调用。

SAS 解题步骤分为 2 个大段，简述如下。

(1)首先编写数据段(data step)程序，例如，以下数据段程序实现读取 C 盘文件上的数据，建成 SAS 的内部数据集。

```
DATA  temp;  /* 数据段开始，命名 temp 为待建数据集的名称*/
FILENAME dat 'c: \ ex1.txt'; /* 指明磁盘数据文件路径及文件名*/
INFILE dat;  /* 打开数据文件*/
...
RUN
```

RUN 表示段的结束。

(2)第二步进入过程段(pricedure step)。编制程序调用 SAS 系统的统计模型；并且要具体给出运算参数，指定输出内容及方式。例如，PROC NLIN；指明调用非线性回归模型；DAT-NULL-；指明不产生 SAS 数据集，输出结果数据报表等。可见 SAS 程序就是用 SAS 语言写成的指令集。数据段完成数据的准备，外部数据除了由数据文件读入，也可在数据段直接内嵌数据；过程段除调用统计分析过程，设置必要的参数外，通过编程给出报表输出格式 。

4. 使用 Windows 下自动化办公组件

在 Windows 环境下,数据库管理程序 ACCESS 及电子表格系统 EXCEL 等办公软件,都具有强的数据库管理系统,丰富的宏命令和函数。以 EXCEL 为例,提供的函数有工程函数、数学函数、统计函数等。利用统计函数,可以计算概率密度、二项式分布概率、简单相关系数、F 概率分布函数、F 检验的结果、线性回归、非线性回归、样本方差、总体方差、样本估计标准差等。

(四) 几种计算机统计分析方法比较

统计分析的计算机处理方法,经历了算法语言、软件包、非过程语言等几个阶段。针对同一个实例,采用不同的统计分析软件,可以得到殊途同归的效果。相比之下,在模块的调度指令、输出内容及格式方面,STATPAK 软件包操作简单,但输出只具备一种标准格式,缺乏灵活性。SAS 系统有自己的语言,灵活性大,功能完善,表现出更强的专业性。编制必要的调用程序,提供适当的接口参数,能够完成复杂的统计任务。适用于水平较高的用户,最大限度地发挥统计分析系统的功能。

在原始数据的输入方面,STATPAK 只具备文件输入一种方式。SAS 除了以文件方式输入数据外,还可以在数据段内嵌原始数据。这与利用算法语言 BASIC 编写输入数据的程序段时,采用的方式有相似之处。

利用 office 办公组件中的电子表格 EXCEL,通过统计函数进行分析作业,能够十分方便、直观地在工作表单元格中输入原始数据。统计函数的调度、使用方法也简洁明了。缺点是输出报表的灵活性以及解决复杂统计问题的能力有限,主要适合非专业统计人员使用。

第三节　农业气象模拟

模拟泛指利用模型进行的实验研究。在计算机上用数学模型进行模拟试验，称为仿真(Simulation)。农业气象模拟包括利用人工气候设施、数学模拟模型、田间试验小区等进行试验研究的一系列应用技术和方法。相对于大面积生产田而言,田间试验小区是缩小了的比例模型;人工气候设施则是自然界农业气候的实验模型。有史以来,实验观察、模型分析、逻辑推理3项活动,就是人类获取知识的最基本方法。农业气象模拟技术利用模型进行试验，把实验观察法和抽象逻辑法结合在一起,具有精密、高效和易于处理的特点,能有效地突破空间和时间的限制,成为现代科学实验的重要手段。

一、农业气象田间试验

田间试验小区是大面积生产田地理、气候、生物等特征的缩微描述。在试验小区内进行地理播种及分期播种,可以模拟出不同的气候类型和多种自然生态条件。田间试验的观测数据，不仅对于分析作物生长发育、产量形成与气象条件之间的相互关系，而且对于检验模拟模型、仿真软件等的实用性和精确度都具有十分重要的意义。

(一)分期播种

利用气象要素的时间变化特征,分期播种农作物,观察分析和研究气象条件与作物之间的相互关系。分期播种法既可使作物的同一发育期遇到不同的气象条件,也可使相同的气象条件出现于作物的不同发育期,从而在1个生产年度内获得较多的试验数据。这种方法常用于研究作物生长发育、产量形成的适宜农业气象条件,以及作物在不利气象条件下受害的时期、症状、机制和指标等。

(二)地理播种

利用气象要素的空间变化特征,选择多个地理类型区,在地理位置、海拔高度、自然景观及气象环境各异的条件下设置试验小区。用地理播种法研究作物和气象条件之间的关系,可以达到缩短试验周期,提高试验效率的目的。但因为各试验点不仅气候类型不同,而且存在土壤肥力和栽培技术等方面的差异,会产生一定的试验误差。

(三)地理分期播种法

以地理播种为基础,再按分期播种法原则,在各个地理播种区安排若干播期。地理分期播种既具备地理播种法的区域特征,又具备分期播种法的季节变化,因而能从时空两方面利用自然形成的气候差别,开展多种农业气象问题的研究。但涉及人力、物力较多,误差产生的可能性也更大。

二、人工气候设施

使用生物环境调节技术,控制植物生长发育的气象要素,对动植物样品进行模拟实验的环境设施,称为“人工气候设施”。人工实验模拟技术,克服了田间试验中气象因子组合的随机性、交叉性、不可控性等缺点,能大大提高试验精度和缩短试验周期。许多尖端科学探索,例如全球变化关于 CO_2 倍增对植物生长发育的影响、太空飞行仓中小麦籽粒产量上限、现代化花卉温室昼温低于夜温的差温管理技术等,都可以通过人工模拟试验,获得必要的技术资料和精确的科学结论。

(一)人工气候室

即大型环境调节实验室。是一种在室内人为控制某些气象要素或模拟自然界特定的天气、气候条件进行生物实验的设施。通过各种机电设备和控制装置,能调节出不同的气温、湿度、光照强度、光照时间、光色、风速、降水等单项及多项复合型变化的气象条

件。作为研究手段,人工气候室主要用于探索气象条件与作物生长发育关系、研究灾害天气对作物的危害、病虫害的发生蔓延规律和防治措施、加速作物的世代繁殖和育种、低温种子贮藏、无土栽培、水产以及工场化生产等方面的试验研究。

第一座人工气候室是1939年由美国植物生理学家Went指导，在加利福尼亚州建立的。随后法国、丹麦、荷兰、前苏联、澳大利亚、菲律宾等许多国家也先后建立了大型的人工气候室。1967年美国威斯康星大学建立了规模更大的综合人工气候室,面积达5 000 m^2。同年,中国在上海建立了第一座大型综合人工气候室。

人工气候室按照系统生态学研究的要求,可分为开环生态系统和闭环生态系统2大类。前者指在地面自然气候环境条件下,建立半封闭的模拟生态环境实验室;后者指全封闭式的模拟生态环境实验室，例如模拟宇宙飞船在外层空间长期封闭航行的完全封闭式生态实验室。人工气候室按实验对象分类，可分为植物、动物、昆虫、综合生物和人类医用等多种。按采光方式分为自然光照及人工光照气候室。按其控制系统可分为中央控调及独立控制式；按设施规模和专业特点可分为综合型和专用型等。

大型人工气候室由1组建筑群构成，通常具备以下部分：

(1)环境调控实验室　包括温湿度调节室、光照室、CO_2浓度调节室、综合实验室等,是人工气候室的主体。

(2)动力室　包括加热、制冷、加湿、除湿、人工光照、排气换气和气体成分控制等各种装置。加热装置有电暖、水暖、汽暖等多种加热方式。制冷装置一般为压缩式制冷,配合喷雾或湿垫进行降温。人工光源常用的有白炽灯、荧光灯、水银灯、氙灯和组合灯光等。

(3)控制室　主要采用电子计算机程序控制的离散型比例—微分—积分式调节。利用各种感应元件，检测气象要素值，通过电子仪器自动记录并用显示屏或数码管显示。

(4)辅助实验室　包括样本培养室、温室、育苗室、考种室、化验室等。

(5)附属设施　值班室、仪器维修室、缓冲室、更衣室、洗手间等。

(二)人工生态气候模拟实验室

随着人类宇宙航行科学技术的发展，未来漫长的宇航岁月里，必须在宇宙飞船内部有一个完整循环的自然生态平衡系统，来支持宇航员的生命与健康。为此目的设计了模拟生态系统实验室生物球 2 号。

生物球 2 号(Biosphere 2)建于美国亚利桑那州南部的吐克琛附近，占地 8 000 余 hm^2，海拔 1 200 m。这是一个全封闭的人工模拟实验模型，人与动物所需的 O_2 及呼出的 CO_2 完全由生长于球内的植物供给和利用。实验室分为 2 类：第一类自然类，包括雨林区、草原区(热带、亚热带)、沙漠区、沼泽区(淡水及盐水)、海洋区。第二类人工类，包括居住区(相当于城镇环境)、农田区。以相似生态理论为依据设计各类生态气候区，各区均配有最少数量物种作为代表。例如，热带、亚热带草原区配置采自南美、非洲及澳洲等地的 45 个草种。农田区的农场包括果林、多年生作物及一年生作物等共 18 个园区。在一年生作物园区内的小块土地上套种不同作物，生产足够 8 个人的食物。根据对食品的需求以及用地和养地相结合的原理，安排作物的轮作换茬制度。

生物球 2 号建成后，经过几年运转，于 1997 年关闭。虽然取得了一定的科学资料和数据，但也表明大型物理实验模型的代价是极其昂贵的。

(三)人工气候箱

研究生物和气象条件之间相互关系使用的一种可控环境实验设备。它与人工气候室的区别是体积小、控制精度高，具有良好的整体性和可移动性。实验人员在箱外对箱内的气象条件进行控调

与测试。箱体较小的类型称为"伸手式"。箱体较大的可容许实验人员进入内部临时作业，称为"进入式"。

人工气候箱作为成型产品的出现，始自澳大利亚的堪培拉环境调节研究室。20 世纪 50 年代在该研究室建成的人工气候室内，配备有多个小型的，能构独立实现温度控制的植物生长箱。后来便以这种小型箱体为基础，发展成能够控制箱内温度、湿度、光照等气象条件的人工气候箱，又称"植物生长箱"。随后在日本、加拿大等许多国家都得到了进一步的开发。20 世纪 60 年代以后，随着电光源技术、制冷技术和微电子技术的发展，改善了光照、温度、湿度的调节控制技术。中国国产人工气候箱于 1976 年研制成功，在随后的短短几年中，生产出 100 多台。20 世纪 80 年代以后的产品大都装配单片微机(microcontroller)实行比例—微分—积分式调节，能根据人们的需要按照预先设计的程序进行自动控制。90 年代初期开始采用变频技术，解决了压缩机频繁启动的问题。制冷机工作时能够根据不同的环境，自动调整功率的大小，不仅节省能源，而且大大提高了控温精度。

分类　人工气候箱从采光角度来分，可分为人工光源与自然光源 2 种；从箱体结构方式分，有单体式与组合式；从体积大小分，有箱式(伸手式)与室式(进入式)。

工作原理　对空气进行加热、降温、增湿、除湿、增加 CO_2 等处理，使其达到预定温度、湿度、CO_2 浓度设定值后，经送风机输送到植物样品区，形成平稳气流。由于灯光辐射会使箱体内空气温度上升；植物叶片蒸腾使空气湿度增加温度下降，植物光合作用使空气中 CO_2 浓度下降 O_2 浓度上升。在这些因素的综合影响下，气流的预定值会发生变性。流动空气把偏离设定值的变性气体带回去进行处理后，再次送入样品区。连续不断的循环往复，保证了流经样品区的空气温湿度及 CO_2 浓度处在设定值范围内。

人工气候箱的结构主要由以下几个部分组成：

(1)框架及壳体　是人工气候箱的主体结构,多呈立方形。箱的中间部分是供实验用的样品区。四周箱壁框架有整体结构的,也有组合式的。人工光源气候箱,箱壁采用不透明绝热材料制成。自然光源人工气候箱,箱壁用透明材料制作,目的是让试验样品接受自然光的照射。

(2)小型空气调节设备　包括制冷装置、加热器和风扇。制冷装置多采用全封闭压缩机。加热器主要采用电热管,依靠风扇鼓风,以空气作热载体,将热量送入工作室。

(3)自动控制系统　采用带有反馈回路的闭环控制系统,对温度、湿度、光照强度进行控制调节。通过电子仪表监测工作室各气象要素的实况。温、湿度调节的设定值可在一昼夜间预先给定,按顺序进行调节。若采用微处理机控制,可用插值法给出任意时刻的设定值。

(4)光照系统　采用白炽灯、日光灯和镝灯。白炽灯有连续的发射光谱,但发光效率低,产热量大,易使工作室内的空气温度升高,影响恒温效果。日光灯的发光效率高,光色也比较好。在对光照度要求不太高的情况下,多采用白炽灯与日光灯搭配的协同照明方式。当需要更高的光照度时,例如,模拟晴朗天气的直射光,使用镝灯或水冷氙灯。人工气候箱的性能指标见表 7 - 3。

(四)人工气候箱模拟试验方法

首先,应借鉴田间试验设计的原则,安排植物试验盆栽材料的排列方式。精度较高的试验,应按拉丁方的排列,同时还应设置保护行,消除箱体内的边界效应。如果箱内生育空间太小,不允许设置重复,则试验材料应尽量集中放置,但这种情况下实验的误差肯定会加大。

用人工气候箱模拟作物生长发育适宜气象环境试验时,各种气象要素的设定值可能需要长期保持不变。随着试验的进行就会出现如灯泡老化、温度设定值发生漂移、植株在垂直及水平方向生

表 7-3　人工气候箱的一般性能指标

	普通型	高档型	备　注
温度控制			
控温范围	10～45℃	10～45℃	全光照条件下
	7～35℃	-5～45℃	无光照条件下
控温精度	±1.5℃	±0.5℃	
控温方式	双位调节	通断式 PID 调节	
	4～24 段变温	24～192 段预置	
湿度控制			
控湿范围	55%～80%	50%～95%	
控湿精度	±10%	±5%	
加湿供水量	10 l/h	10 l/h	
光照强度	1.5 万 lux	6 万 lux	距灯下 1 m 测量
平均气流速度	< 0.5 m/s	< 0.3 m/s	
程序控制能力	数字编程	键盘作业，自动插值	
记录与显示	数显，小型圆图	数显，配微型打印机	
数据传输接口	无	RS-232 接口，配有调制解调器	

长量的增加改变了叶片层的受光强度等问题。要求使用精确的检测仪表认真监测，及时发现这种长期运行中潜移默化的现象。当使用到 2 个以上的人工气候箱同时进行对比试验或重复试验时，更要注意长期运行条件下各箱体的一致性，防止试验条件的均一性受到破坏。

如果需要重复试验，应该选用相同初始状态的盆栽材料，分别设置处理与对照(不加任何处理)。若试验人员发觉或怀疑气温有微小变动，有可能在处理间造成不良影响时，利用对照植株可以对气温的微小变化进行检验。

用人工气候箱精确分解离析环境时，通常需要连续改变某一种或几种气象要素设定值，而保持其他要素不变，研究特殊气象环

境对作物生长的影响。对于这种设定值随时间而变化的气象要素，可采用程序控制。目前在人工气候箱中的试验，主要以气温、空气湿度、日照、降水、空气成分(CO_2浓度、有害气体浓度)等要素为模拟对象。在进行包括土壤环境的多要素综合模拟试验时，需要增加对土壤或营养液肥力因素的控制。

(1)农业生物样品准备　包括种苗和土壤(或基质)。种苗要有一定数量的备用品。要求选育健壮、整齐一致、发育期符合设计要求的样品，一般采用盆栽法培养。盆栽样品需要根据作物的特点选择适宜的土壤或基质。盆土数量、酸碱度、土壤湿度应保持一致。

(2)试验的前处理　根据需要和可能，视人工气候箱的数量决定是否分批处理。若人工气候箱数目较少时，不同水平的处理组合要分批培育。为避免先后分批入箱样品前期生长环境不同带来的差异，可将不同播期的样品放入温室，以相同环境条件进行培植，消除非试验因子的影响和干扰。

(3)试验的后处理　一般应不失时机取样考种观察。但有些试验往往要经过一段相应的培养时期才能测定出其滞后效应。为避免其他干扰因子的影响作用，处理结束后的样品，应放入相同的适宜环境中培植，以备到达某发育阶段进行综合考种用。有些对比试验需要同一张照片上显示出差异，为此目的，对于早先出箱的材料应低温保存，以备和后出箱的材料同时拍照。

三、农业气象数学模拟

(一) 常用的各类模型

1. 作物气象模型

农业气象数学模型中研制发展最快，成效也比较显著的是作物气象模型。属于栽培生理方面的如：作物生长模型、最优群体动态模型、产量形成模型等。属于作物生理方面的模型如：光合作用

模型、呼吸作用模型、叶面气孔阻力模型、营养输送及再分配模型等。

作物生长模型是一种动态模型，通常包括若干子模型，例如，发育期动态模型、发育期动态光温参数模型、叶龄动态模型、器官形成模型等。以水稻发育期动态模型为例，具代表性的“水稻钟”模型(高亮之等　1992)的数学表达式如下：

$$R = K[(T - T_b)/(T_0 - T_b)]^P[(T_c - T)/(T_c - T_0)]^Q \cdot e^{G(D-D0)}$$

式中　R 为发育速度；K, P, Q 为模型参数，分别与最适、下限、上限温度界限范围内发育速度有关；T_b, T_c, T_0 为发育期的下限、上限、最适温度三基点；T 为发育期日平均气温；D, D_0 为平均日长及临界日长。

上式表明，当温度 T 等于最适温度 T_0、日长 D 等于临界日长 D_0 时，$R = K$，即模型参数 K 等于最适条件下的作物生长发育速度。当发育期日平均温度 T 小于或等于下限温度、等于或大于上限温度时，作物发育速度为 0。

2. 土壤气候模型

基于农田水分平衡原理，土壤水分动态模型的表达式为：

$$W_n + 1 = P_n + W_n - [ET_n + (F_{in} - F_{out}) + (D_{in} - D_{out})]$$

式中　$W_n + 1, W_n$ 分别为该时期开始时和下一时期开始时的土壤水分含量(mm)；P_n 为该期间降水或灌溉量(mm)；ET_n 为该期间蒸散量(mm)；F_{in}, F_{out}为该期间地表水流入、流出量(mm)；D_{in}, D_{out}为该期间耕作层土壤水分渗漏量、补给量(mm)。

基于水分平衡原理的动态模型，包括土壤蒸发、叶面蒸腾、毛管水运动、渗漏、径流以及水分胁迫对光合作用、授粉率、籽粒重等子模型。而每个子模型又可能由更低一级的二级子模型构成。

土壤温度及水分状况不仅通过对有机肥的分解、熟化，和对

化学肥料的稀释、溶解影响肥效，而且通过对根毛活性的作用，影响作物对水肥的吸收速度。土壤氮素动态模型根据土壤氮素转化基本原理，描述有机质矿化与生物固氮、硝化与反硝化的平衡、化肥及有机肥的添加、挥发与淋溶等复杂过程。

3.设施小气候模型

以温室花卉株高控制模型为例，该模型在美国、加拿大、新西兰、北欧等国较有影响。从研究一品红(poinssttia)节间伸长规律进行了探索。在统计分析基础上，用理查兹函数拟合各节间的伸长，建立一品红侧枝伸长数学模型，预测从摘心到开花逐日的侧枝长度。模型精度在平均值的1个标准差内。此外用 Euler 积分建立了一个动态模型，以便预测逐日昼温与夜温变化对株高的影响。动态模型是由对理查兹函数一阶微分输出求积分而得到的(假定温度的效应是即时的，当天对下一天没有滞后效应)。预测出在给定时间间隔内茎的累计伸长数量(即每日伸长速度)，并以时间为单位进行积分，如下式：

$$L_{(T+DT)} = L \oint_{T}^{T+DT} R(X)\mathrm{d}X$$

式中 L 为节间长度；DT 为在模型中使用的时段(日)；R 为与节间长度有关的统计参数。

在动物设施小气候方面，以热环境模型最为常见。模型主要考虑畜禽舍的热环境受舍外气候条件、建筑热特性、畜禽产热与产湿、通风换气等因素的影响。20世纪70年代开始使用热环境模型分析舍内热状况。根据舍内舍外温度、太阳辐射、维护结构热特性、加热设备产热量、动物显热产生量、屋顶和墙体的传热量、地板传热量、通风带进和排出的热量等因素的交互作用，建立稳态、准稳态热模型。利用模型可以求出舍内空气及维护结构各材料层的温度。但这种稳态、准稳态热模型不能满足计算畜禽舍运行荷载，分析预测舍内瞬时热状况以及进行温度控制和自动化管理的要

求。20 世纪 90 年代，中国学者在对舍内空气温度进行瞬时分析的基础上，建立了优化环境及自控模型。以肉鸡舍动态热模型为例，有以下表达式：

$$[A][T] = [B]$$

式中　[A]反映鸡舍的几何特性和热特性；[T]反映任意时刻舍内空气温度和内表面温度，即舍内热状态；[B]除与鸡舍的维护结构热特性有关外，主要取决于影响舍内空气热状况的内扰和外扰。这些扰动因素有：太阳辐射、动物产热、冷热负荷、舍外空气温度、上一个单位时刻舍内热状态的后效等。类似的模型既可用于设施建筑设计，也可用于热环境的分析预测及控制。

4. 作物产量预报模型

产量预报的主要依据是气象、土壤、品种及栽培条件。用作作物产量预报的数学模型比较多，大体上可归纳为 3 个类别：

(1)统计学模型 (static regression model)　统计学模型是一种静态模型。模型对作物与气象条件之间的各种复杂关系进行了简化。不需要对作物和影响因子的变化过程提出假设，也不需要详细输入多种资料，在只有作物和天气 、气候资料可供使用的情况下，能很好的分析作物对天气、气候的反应。作物产量及其影响因子由 1 个类似代数方程式的表达式给出。表达式不包含任何与时间有关的变量。表达式中的系数通常根据统计学回归分析法求得。产量作为目标变量，气象因子作为测报变量。利用统计学的逐步回归方法，从众多的气象要素中筛选出起主要作用的气象要素做测报变量。简单的产量预报公式可以是一元线性回归的形式：

$$Y = b_0 + b_1 X$$

式中　Y 表示产量；X 表示某一物候期或整个生育期间的降雨量或其他气象要素。美国玉米产区使用的另一种产量模型，根据逐月的气温、降水、栽培管理技术和产量之间的回归关系建立。在

“大范围作物产量报表试验”(LACIE)项目中测报每公顷玉米产量。使用类似多元线性回归的形式：

$$Y = A + B + C$$

式中 A 是多年平均的气象因子；B 是技术进步因子；C 是当年的气象因子。

统计学模型特别适合大面积或国家级产量预报。日本农林渔业省就采用这种方法预报。模型的精度主要受生态环境、耕作方式、科技水平等的影响。模型应对这些影响因素认真考虑并不断修正。一旦这些因素发生了变化，就应该重建新的模型来取代旧模型。

尽管统计回归模型的测报变量各因子间必须是互相独立的，但气象因子间的各要素，例如降雨、温度、日辐射显然是相互关联的。这就使得统计模型的稳定性变差。在统计模型中用气候指标来替代气象要素，可以在一定程度上使这个问题得到改善。例如20 世纪 80 年代初期，澳大利亚首先使用湿度变差指标预报冬小麦产量。同一时期对半干旱区的产量预报，则使用了降水量与可能蒸散量的差值。统计模型的另一个缺点是不能够展示在作物生长与产量形成全过程中，随时间发生变化的状态或格局。这一缺点严重地限制了统计模型在实时产量预测系统中的应用。

(2)生理学模型(physiologically based model)　生理学模型是建立在作物生理学、生物物理学、物候学等理论基础上的一种动态模型。生理学模型使用状态变量(X)表示当前作物的状态(例如，干物重、叶面积指数、生物学产量等)；速率变量(R)表示状态变量的变化速率；环境变量(E) 和表征 X, R 和 E 之间的参数、系数等构成。具有类似以下的表达式：

$$X = \int R\mathrm{d}t \quad 及 \quad R = f(X, E)$$

表达式意味着在产量—天气系统的模型中，只要设定环境条件和

初始条件，就可以求出随时间变化的动态行为。

1970 年以后，出现了很多模拟各种作物的生理学模型，其复杂程度各不相同。大致上可以归为 2 类，即生理学理论模型和生理学简化模型。生理学理论模型是土壤—植物—大气连续体内作物生长过程以及土壤、大气、植物三者之间错综复杂关系的数学语言解释；连续体由各种不同关系的多级子模型，例如：叶龄发育模型、作物生长模型、光合与呼吸模型、蒸腾模型、基制分裂与器官形成模型、干物质增长模型、土壤氮肥动态模型、农业天气或随机天气气候模型等有机结合组成农业产量预测模型。

生理学理论模型要求大量参数、系数描述特定作物品种的生理过程，限制了在一些地区或国家的实际应用。生理理论模型主要用来深入理解和探讨作物产量和气象环境之间，基于生理学和生物学的相互作用过程。固又称之为解释模型(comprehensive process model)。

(3)生理学简化模型(simplified process model)　生理学简化模型与生理学理论模型的区别，首先在于目的不同。简化模型的目的是针对作物生产实际，进行切实可行的产量预报。其次是实验依据不同，理论模型通过实验室的室内测定取得数据；而简化模型主要根据田间试验数据。在模型化的过程中，简化模型扬弃了理论模型中大量详细的数学分析和过程推导，代之以简单的关系描述；保留了生理模型的动态特性以及物质和能量守恒原理。

例如，生物学产量的积累过程，在理论模型中通常用单叶片的光合作用、独立器官呼吸作用的积分方程组求解；而在众多的简化模型中，则用生物学产出速率与作物截获或吸收的辐射量成比例关系的原则推算，一般可表式为：

$$dW/dt = C_s S\,[1 - r - (1 - r_0)\exp(-KF)]$$

式中　W 为干物重；t 为时间；C_s 为辐射量至生物量的转换系数；S 为入射辐射量；K 为消光系数；F 为冠层叶面积指数；r，r_0 分

别为冠层及土壤反射率。辐射量至生物量的转换系数、消光系数 C_s 和 K 可以在实验室求得，也可以通过田间实验或从生理模型反推得到。早在1977年Monteith提到了这一转换系数的实验求解。高亮之(1989)的研究报告介绍了详细的求算方法和结论。当超过一定的阈值以后，辐射量至生物量的转换系数，在一个很宽的范围内不受气候及肥力的影响。这一规律可以作为通用产量预报的基础，至少可用作生产潜力的估测。因此，简化模型的应用越来越普遍。1984～1992年间研制开发用作产量预报的单一作物模型有：马铃薯、水稻、小麦、大豆、向日葵、玉米等，以及一年生作物通用预报模型MACROS等。

(三)农业气象数学模拟及计算机仿真

数学模拟的意义和作用，不仅是对生物与环境统一体中某些现象、过程或系统进行描述、解释，更重要的是，在作物生长发育的机理研究中，数学模拟方法是一种新型开发工具。越来越多的科学研究者关注数学模拟方法，以模拟为科学实验手段，来分析农业生物和气象环境、生态环境之间的相互关系。

利用计算机进行模拟，需要提供相应的系统仿真程序。例如，CERES系列作物生长模型，采用FORTRAN算法语言编制成求数值解的计算程序，再配以相应的用户界面，集成化为作物生长仿真软件。国际上与CERES模型相似的常用作物生长模型还有MACROS, RICESYS等。以上述3种模型为例，表7－4给出了运行参数及要求输入的气象要素清单。

在作物生产管理实践中，模型是一种辅助决策工具。根据用户输入的天气气候资料、作物遗传特性和土壤物理化学特性等原始数据，经计算机求解后，可输出作物生长发育、产量形成和土壤水分状况等动态模拟过程。大多数的模型利用输入的变量和参数，可以模拟以24 h为时间单位的生长发育、光合作用、呼吸作用、营养物质的传输和运转等过程。

表 7-4　3 种作物生长模型输入对比

模拟试验所需输入的气象要素	CERES-RICE 模型	MACROS 模型	RICESYS 模型
1.作物生长	光合有效日辐射 日最低温度 日最高温度 日降雨量	光合有效日辐射 日最高、最低温度 日降雨量、水汽压 日照时间、风速	光合有效日辐射 日最高、最低温度
2.光合作用			
气象因子	光合有效日辐射 温度、蒸腾速率	光合有效日辐射 温度、相对湿度 及蒸腾速率	光合有效日辐射 温度
作物状况	氮肥量、密度 及叶面积指数	氮施用量、叶层 覆盖度、碳水化合 物积累、物候期 及气孔阻力	氮、碳水化合物
冠层结构	叶面积指数	按最大光合速率 及光能利用率分 5 个等级	
3.呼吸作用			
维持补偿	不 详	温 度	温 度
4.营养运转及分配	物候期、“源”容积 “汇”需求量、氮素 水平、土壤水分 优先律	物候期、优先律 源容积	优先律、“汇”容积 氮素水平

其他影响较大的作物仿真软件有：棉花仿真软件 SIM-COT，棉花管理专家系统 COMAX 等。COMAX 是微型计算机上开发和运行的智能软件，1986 年由美国农业部组织研究成功，可向农民提供施肥、灌溉、喷药和收获等综合信息。1991 年密执安州立大学和新西兰农渔部联合研制，用于温室花卉计算机控制的 CARE-SYSTEM 专家系统。该系统是设施环境控制的应用软

件，包括：数据库、模拟库、知识库、推理机和网络通讯等，与前馈反馈式环境控制计算机系统连接，实现智能化控制。

第四节　农业气象系统分析方法

系统分析方法是从系统的观点出发，综合地、精确地考察研究系统内各组成部分以及系统与外部环境之间的相互联系、相互制约、相互作用规律，探索最优化管理问题的一门新兴学科。系统分析既是一种研究策略，又是一类技术科学，包括辅助决策和系统方法论等方面的内容。农业气象系统分析方法从系统科学的整体观点出发，围绕优质、高产、低消耗目标，对农业生物与环境之间的关系进行分析和综合。运用已有的科学定理、定律、定量计算及最优化技术等为决策者提供专业研究信息、资料和各种供选择的策略，以便从中择出最佳决策方案。

一、系统的概念

系统是指由相互作用、相互依赖的若干组成部分结合而成，具有特定功能的有机整体。小到1个基本粒子，大到整个宇宙都可以看成是一个系统。系统的基本属性和功能表现为接受物质、能量或信息，并变换、产生另一种形态的物质、能量或信息。系统的组成部分叫子系统、元素或单元。农业生产本身是一个庞大的系统，土壤—植物—大气连续体可以看作是一个复杂系统，同时它也是生态系统中的子系统。

系统接受的物质、能量或信息叫系统的输入，变换后产生的另一种形态的物质、能量或信息叫系统的输出。不同性质的系统，其功能和输入输出的内容也就不同。如农业气象系统是输入光、热、气、水和各种生产参数，经过农业生态系统或各种生物群体的加工转化，最后输出粮、油、肉、蔬菜和瓜果等农产品以及各种产品的数

量和质量的有关信息。

二、系统分析的原则

(一)全局化原则

系统分析的基本观点是全局化。系统本身是一个复杂的综合体,组成系统的各个子系统或单元都有自己的属性,全局的属性一定大于各组成单元在孤立状态时所有属性的总和,这就是全局观点。研究大系统时应综合考虑科学技术和社会经济各个方面,同时还要综合利用各门学科的知识和技术,从微观和宏观两个方面进行探索。既要注重当前的状态,又要兼顾过去的变化及未来的动向;既要注意系统内部各单元的关系,又要注意系统与环境的条件关系,包括直接的和间接的关系;全局化原则为规划和设计系统、管理系统提供了科学的理论和根据。

(二)模型化原则

系统分析的手段是模型化,即用模型代替真实系统进行实验,以求认识真实系统的特性和规律。由于系统问题的复杂性和多变性,难于直接对系统本身进行分析或试验,常常要采用与系统相似的模型。系统之间存在着相似性,从某个系统上总结出的规律,可以推广和还原到相似的系统上去。模型化原则一方面针对复杂系统直接进行分析和实验的困难,阐明了实现最优化原则的手段和途径,另一方面也为研究农业生物与环境的关系提供了客观、定量、精确的切实有效的分析方法。

(三)最优化原则

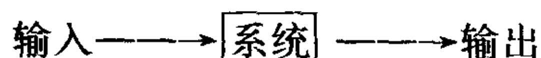
系统方法的目标是最优化。没有最优化就无所谓决策,决策的目的就在于择优。在设计或改进系统时,应使系统在总体上最优,即在环境允许的前提下使整个系统对空间、时间、物质、能量和信息的利用率最高。在这一原则的指导下,先后产生和发展起来各种最优化方法论,为人类科学地认识和开发自然资源提供了有

力的工具。

三、一般系统论

(一)系统的功能

如果将系统的功能予以抽象,则任何复杂的系统都可以用下面的框图表示:



输入表示外界环境对系统的影响;输出表示系统对外界环境的影响。与系统发生作用而又不包含在系统内的各个事物组成的整体叫系统的外部环境,简称"环境"。

(二)系统的平衡

生物系统只有不断地进行新陈代谢,才能保持有机体内的平衡状态 。任何一个按照自然规律运转与演化的系统,总是趋于保持固有的稳定状态。如果在某种扰动的作用下暂时偏离常态,一旦干扰消除,系统又会回到原来的状态,称为"系统的平衡"。动态平衡是指系统运转中的任意瞬间,已输入的总物质、总能量和已输出的总物质、总能量都分别守恒。例如辐射平衡、热平衡、水分平衡以及生态平衡等。而静态平衡则是指系统在执行功能的时段内已输入的总物质、总能量和已输出的总物质、总能量分别守恒。

(三)反馈规律

反馈是把当前输出的一部分返回给输入,根据当前输出来改变输入的一种手段。例如在电子放大器的设计中,人们把放大器的一部分输出送回到输入端,以求得某种需要的性质,如减少内部杂音和非线性失真等。反馈原理在控制技术中被广泛用来设计各种反馈控制系统。实际上在自然界和人类社会中,反馈现象相当普遍。社会科学中的"从群众中来, 到群众中去"; 农业气象中的"农业气象调查",就是取得反馈信息的重要手段。

正反馈使结果不断强化,常被用来放大某一种作用或某一种

效应。例如,电磁振荡采用把输出振幅的一部分回授给输入端,获得最大振幅。负反馈能使输出量抑制输入,所以常被用来保持系统行为的稳定。例如,反馈抑制就是生物的一种自我调节作用。对系统的行为进行恒值控制是通过一个反馈控制系统来完成的。控制机构把控制信息输送向执行机构,对被控对象进行调节。调节的效果信息化为反馈信号,再次送回控制机构,作为决定或修改下一步控制调节的依据。

例如,要控制温室内部的空气温度,使它接近于额定的设定值。当气温过高,反馈装置就会把误差情况通知控制机构,控制机构发出控制信息,命令执行机构关小阀门,使热水输入温室的数量减少。当室温过低,反馈装置又把新的误差通知控制机构,控制机构再次发出控制信息,命令执行机构把热水阀门开大,使输入温室的热量增加。在这种反馈控制下,温室内的空气温度便会稳定在设定值附近。

(四)前馈控制

前馈控制是根据控制对象的环境条件,在干扰信号尚未影响到控制对象之前,完成预测并抢先去控制的一种方式。能够起到"防患于未然"的作用。前馈控制能和其他控制方式并用,提高控制水平。在已应用的前馈控制中有自适应控制或自学习控制、自动最优化控制、最优控制和计算机梯阶式控制。

四、系统的数学模型化方法

(一)系统状态与状态空间

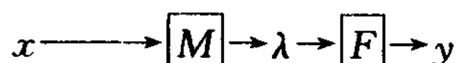
1. 系统的状态与输出

系统分析的目标是为系统的最优化而进行的分析、评价和综合。对于系统的最优化来说,系统的控制和预测是主要的问题。因此,在系统工程中需要把系统变成数学模型。把系统的动态特性变成数学矩阵,称为"状态变量表示模型"。这种建立模型的方

法叫做“状态空间法”。众所周知,向系统施加一定的输入量,就会导致系统内部状态的改变并出现某些输出响应。一般说来状态不等于输出。系统中许多状态变量是无法测量的。但状态的变化直接导致输出的变化,输出是状态的函数。

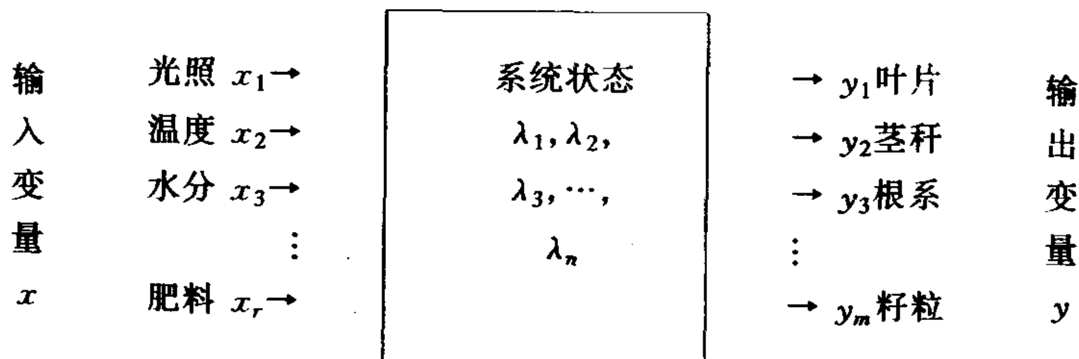
为表明输入变量和输出变量之间的关系,可以把系统对象分为 M 和 F 两部分的形式。其中输入量 x 经过 M 成为环境状态 λ;而状态 λ 经过 F 又成为输出量 y。M 是运动过程;而 F 仅是个函数对应过程。

输入变量和输出变量之间的关系图示如下:



2. 状态空间与状态方程

状态空间 用矩阵代数,将高阶微分方程化为一阶微分方程,以便于研究系统或过程。例如,现有 1 组 r 个输入变量 $x_1, x_2, x_3, ..., xr$ 和一组 m 个输出变量 $y_1, y_2, ..., y_m$。由于相互关系复杂,为使方程阶数降低需引入中间变量,或称状态变量,用 1 组 n 个变量 $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n$ 表示。这 3 组变量分别称为输入矢量、输出矢量和状态矢量。描述输入量有 r 个变量,输出量有 m 个变量,状态量有 n 个变量,总共有 $r+m+n$ 个变量。因此,可以将系统的任意一种状态看作是 $r+m+n$ 维空间中的 1 个点,这个多维空间称为系统的状态空间。



状态方程　系统在时间为 t 时的状态矢量 $\lambda(t)$，可由初始时刻 t_0 时的状态矢量，及直到时刻 t 为止加在系统上的输入矢量来表示：

$$d[(t)]/dt = F\{\lambda(t_0), x(t_0, t)\}$$

式中　$\lambda(t_0)$ 为初始状态矢量；$x(t_0, t)$ 为 t_0 至 t 加在系统上的输入矢量。

同样，时间 t 时的输出矢量 $y(t)$ 可表示为：

$$y(t) = C\{\lambda(t_0), x(t_0, t)\}$$

采用微分方程来表达，则有以下联立方程式：

$$d[\lambda(t)]/dt = A(t)\lambda(t_0) + B(t)x(t)$$

$$y(t) = C(t)\lambda(t) + x(t_0, t)$$

这两行方程分别称为“状态方程”及“观察方程”。$A(t)$，$B(t)$，$C(t)$ 矩阵分别为：

$A(t)$ —系数矩阵；$B(t)$ —控制矩阵；$C(t)$ —输出矩阵；$y(t)$ —输出矢量；$x(t)$ —输入矢量。

对离散系统状态方程和输出方程的描述为：

$$\lambda(n+1) = A\lambda(n) + Bx(n)$$

$$y(n) = C\lambda(n) + x(n)$$

式中　n 表示采样时刻；$n+1$ 表示延时到下一个采样时刻。

3. 系统的可控制性与可观察性

(1)系统的可控制性　用状态方程描述被控过程时，对于任意初始状态 $\lambda(t_0)$，当 t_0 为任意值时，若总可以加上一个适当输入，在有限时间内使它的各个状态变为 0，则称此过程完全可控。如果只有对部分状态变量可以做到这一点，就称系统是不完全可控制的。

(2)系统的可观察性　如果被控过程的初始状态 $\lambda(t_0)$，能在

一定的有限时间间隔内，根据过程输出 $y(t)$唯一地确定，就称此过程可观；在任意给定值，若测量输出 $y(t)$ 可以确定状态变量 $\lambda(t_0)$，则称此系统为完全可观。

(二)系统的模型化

系统的模型是实际系统合理的抽象与有效的模仿。它能表征系统的本质属性和主要特征。

1. 模型化的一般原则

(1)相似性原则　模型和原型应尽量相似，在一定的近似程度内，能够确切地反映系统的客观实际情况。如果相似性没有保证，通过模型研究出来的规律就无法还原到原型系统上去。

(2)简捷性原则　在满足相似性的基础上，尽量使模型简单明了，以降低求解难度。模型应只包括与研究目的有关的方面。研究的目的不同，模型也不同。

(3)精确性原则　建立模型时要保证有必要的精确度。模型的精确度与条件有关，同一系统的模型，由于条件不同，对精确度要求也不同。建模时精确度的选择要适当。

(4)可控性原则　模型表示的系统一定要能控制，如果不能控制，建立的模型就会毫无意义。

2. 模型的分类

(1)基本分类　按模型的最基本形式，分为形象模型和抽象模型 2 大类。形象模型包括比例模型、实验模型等。抽象模型包括概念模型、图式模型、数学模型、网络模型、生态模型等。

实验模型　实验模型是根据系统之间的相似规律而建立起来的一种模型，模型和原型之间只有大小比例上的不同，其物理过程都是一样的，模型只不过是原系统精巧的放大或缩小。土壤样品、田间的试验小区、人工气候箱(室)等都是实验模型。实验模拟是以模型和原型之间的物理相似或几何相拟为基础的一种模拟方法。运用实验模拟可以使人们对系统的分析研究更加接近实际情

况，在建立数学模型时所忽略的因素对系统的影响，在实验模拟中都可以得到反映。但模型是专业的，不同的物理系统要有不同的实验模型，通用性不强。如果对复杂的系统进行实验模拟需要很大的投资。

网络模型　用来描述系统内物流、能流、信息流方向、流量或元素之间在空间、时间上的相互关系的网络图叫“网络模型”。常见的信号流图、程序框图、系统结构图等都是网络模型。

数学模型　数学模型是系统分析中使用最多的模型。系统的数学模型由1组用来描述系统静态或动态特性的函数式构成。系统的数学模型是系统观点和系统方法在数学应用上的具体表现。数学模拟是以模型和原型之间在数学形式上相似为基础的一种模拟方法。自然界的这种统一性，为数学模拟提供了客观基础。任何两种不同的物理过程，只要它们所遵循的规律在数学方程上具有相同的形式，就可能用数学模型的方法进行研究。

(2)农业气象数学模型的类别　按模型时态划分，有静态与动态之分。静态用于研究某一特定时刻农业生产与气象条件的关系，涉及的参数不随时间而变化。动态用于研究这种关系随时间的变化规律，各个参数也随时间而变化。利用动态农业模型模拟的结果更符合实际，但建立起来比较困难，常用到微分方程组或状态方程。按建模的原理区分，有统计学模型、生理学模型。统计学模型以统计学理论为基础，对多年观察资料进行统计分析。生理学模型以能量平衡、质量平衡、光合生理、营养传输过程等的机制为基础，对作物的生长发育和产量形成进行严谨的数学处理和分析。

农业气象数学模型的尺度大小不等。以空间尺度而言，其中较大的模型包括1个(或多个)农业气候类型区。例如CERES作物生长模型，主要用来在不同农业气候类型区之间进行技术推广和移植。空间尺度较小的可以小到1片叶或1个气孔，例如气孔

蒸腾阻力模型。在时间尺度上，农业气候模型，使用年、月、旬数据资料;作物气象模型的时间尺度，以“日”或“小时”为单位。温室环境的自动化控制模型,则以“分钟”为单位实现前馈反馈的采样控制运算，给出控制量和实测要素值。

3. 农业气象模型建立方法、步骤及其检验

(1)模型建立方法　首先要明确目的。通过对实际系统深入调查研究,确切了解系统的范围、要求达到的目标、判别检验的准则。明确模型中所要考虑的因素以及外部环境因素、约束条件等。只有通过认真仔细的分析，对系统具备了深刻的认识之后才能为系统建立一个成功的模型。

模拟实验法　某些系统的性能和行为，很难建立数量描述，如果其结构和性质与另一种易于处理的系统相同，其模型也必然相似，处理起来就简单得多。例如光热条件与植物器官的形成，在大自然气候条件下很难精确的定量描述，而在人工气候箱中试验观测就方便的多。“热应器官形成学”(Thermomorphogensis)中的许多量化规律性认识和发现，正是以气候箱作为自然生态系统的替代模型，以模型为对象进行大量试验的结果。

数据分析法　有些系统涉及因素很复杂,问题的结构、性质和机理尚未了解清楚,这时可以通过反映系统功能和特征的数据,采用适当的方法收集真实可靠的资料，对资料进行分析，分清主次因素,概括出本质内涵。将本质因素及其相互关系用数学语言加以描述。

(2)构建模型的步骤　根据系统的特征和服务对象,确定模型的种类。选用数学工具描述变量间的关系,确定其中参数,构造一个能描述真实系统主要特征的数学模型。若模型的叙述过于简略,不能准确描述问题，就需要重新设定条件，再重复构建；反之,若包括的要素过于庞杂，得到的模型很难求解，也要对所考虑的要素作简化。如删去个别变量，合并某些变量，改变变量间

的关系，将不太重要的变量在一定条件下看作常数，放宽约束条件，等等。经过修改最后应得到既符合实际，又具有一定精度，简单和容易求解的模型。

(3)模型的检验

模型启用之前，必须通过检验，目的在于检验模型的实用性和精度。一般需要有以下 3 个步骤：

①田间观察　按照模型的范围、对象、性质和功能，选择同类型作物农田，安排观察试验。全面收集与模型检验有关的数据资料，例如气象要素、水肥管理、作物生育状况、产量形成进度等。如果以前有过类似试验观测记录，可省略田间观察步骤。

②模型试算　根据田间观察数据，按照模型的使用说明，分别代入输入变量、参数和初始条件。经核实无误后，启动模型进行数值运算。详细记载输出的模拟运算结果。利用模型输出的估算值与田间观察的实际值做定性比较。

③误差分析　在定性比较认可的基础上，利用统计学方法进行误差分析。具体的检验方法可以通过模拟值与实测值的对比，测度两者间的拟合度、平均绝对误差、绝对误差的标准误等。

五、系统决策与优化

(一)决策概念

决策指运用决策论、规划论等科学原理和方法，系统分析主客观条件，从若干个准备实施的方案中，选择制定出为实现特定目标的最优方案。决策的目的在于科学化管理，科学化管理依赖于系统决策的优化。不断决策与择优行动构成了科学化管理的全过程。

决策通常可以分为方案提出、择优行动、效果评估 3 个步骤。从实施效果上看，如果目标达到了最优值，称最优决策；若目标未达到最优但还算满意，称满意决策。作物品种和农业技术措施

的选用、作物种植比例的合理安排以及农业气候资源的合理利用，都可以用决策论和规划论来解决，取得满意决策或最优决策。

根据决策所处的状态，一般有确定型决策、风险型决策、不确定型决策等。确定型决策是指在确定条件下的决策；风险性决策是指每一种自然状态均可能出现，决策时对各种状态出现的概率是已知的。不确定型决策是指在各种自然状态出现的概率未知情况下作出决策。

以风险型决策为例，这种决策方法是按最大期望效益或最小期望损失为标准进行的决策。决策时需要根据过去的经验、统计资料或调查研究、预测等手段确定每一种自然状态可能发生的概率。在无法得到这些概率的情况下，也可以直观判断得出，称为“先验概率”。由于先验概率带有主观性，根据先验概率的估计做出决策应特别慎重。

设有一作物布局问题，在雹灾多发区无灾、轻灾、重灾 3 种自然状态出现的概率分别为 0.25，0.40 和 0.35；可采用的种植方案有西瓜、糯玉米、白薯 3 种(表 7－5)。西瓜每 667 m^2(1 亩)在各种自然状态下的产值分别为 2.0 万、0.8 万和 0.1 万元；糯玉米每 667 m^2(1 亩)在各种自然状态下的产值分别为 1.0 万、0.8 万和 0.2 万元；白薯每 667 m^2(1 亩)在各种自然状态下的产值分别为 0.8 万，0.7 万和 0.6 万元，问如何决策才能使种植方案最优？

表 7－5 作物布局决策表

	$P(\theta_1)=0.25$ 无灾	$P(\theta_2)=0.40$ 轻灾	$P(\theta_1)=0.35$ 重灾	期望值 $E(A_i)$
A_1西瓜	2.0	1.0	0.1	0.94
A_2玉米	1.0	0.8	0.2	0.64
A_3白薯	0.8	0.7	0.6	0.69

最大效益期望值 $\max E(A_i)$　　0.94

选中的方案　　$A1$

在决策表 7－5 中：

西瓜的收益期望值

$$E(A_1) = 2.0\times0.25 + 1.0\times0.4 + 0.1\times0.35 = 0.94$$

糯玉米收益期望值

$$E(A_2) = 1.0\times0.25 + 0.8\times0.4 + 0.2\times0.35 = 0.64$$

白薯的收益期望值

$$(A_3) = 0.8\times0.25 + 0.7\times0.4 + 0.6\times0.35 = 0.69$$

因为 $E(A_1)=0.94$ 最大，所以方案 A_1 即种植西瓜为最优决策方案。

(二)数学规划

数学规划主要用于最优化设计，如农业项目投资决策、农业规划、水资源调度、最佳的灌溉期和灌溉量的确定、农场经营与优化管理等方面。系统的最优化包括两方面的意义：从空间角度上讲，要求全局最优；从时间角度上讲，要求全过程最优。线性规划、非线性规划等属于静态数学规划，用来求解全局最优问题。动态规划采用状态空间方法，解决全过程最优的问题。

1.线性规划

目标函数和约束方程都是线性的数学规划。例如，现有玉米、大豆、小麦共有 100 kg，其籽粒含氮量分别为：2.0%，4.5%，2.5%，欲配制成含氮量不低于 3.5% 的混合营养粉。已知玉米、大豆、小麦籽粒每 kg 价格分别为 2.0，3.4，2.8 元。求按何种比例配方，才能使成本最低？

假定玉米、大豆、小麦籽粒各取 X_1, X_2, X_3 kg 成本最低。总共用去的籽粒量重 $X_1 + X_2 + X_3 = 100\ kg$，混合后的含氮量为 $(2X_1 + 4.5X_2 + 2.5X_3)/100 \geqslant 0.035$。

另外，这三种籽粒都需选用到，即 X_1, X_2, X_3 的值都必须大于0。这里的 X_1, X_2, X_3 是反映系统内部要做出决策的具体对象，称为“决策变量”。它受制于以下5个起限制作用的条件：

$$X_1 + X_2 + X_3 = 100$$

$$(2X_1 + 4.5X_2 + 2.5X_3)/100 \geqslant 0.035$$

$$X_1 > 0$$

$$X_2 > 0$$

$$X_3 > 0$$

用决策变量 X_1, X_2, X_3 表示的这5个函数方程或不等式称为“约束条件”，是决策变量所受到的限制。相应的最低成本 S 为：

$$S = 2X_1 + 3.4X_2 + 2.8X_3$$

S 是决策者所选择的系统效益指标，称为“目标函数”。目标函数的形式也用决策变量来表示。实际构造的线性规划数学模型，如果约束条件中含有不等式，需在不等式中引入1个非负的松弛变量使之化为等式，以便于应用线性方程组的一些基本原理进行解题。经过数学变换的线性规划标准形式一般表示如下：

目标函数： $\min f(x) = c_1 X_1 + c_2 X_2 + \ldots + c_n X_n$

满足约束： $a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \ldots + a_{1n}X_n = b_1$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \ldots + a_{2n}X_n = b_2$$

$$\cdots\cdots$$

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \ldots + a_{mn}X_n = b_m$$

$$Xj \geqslant 0, (j = 1, 2, \ldots, n)$$

式中 m 为约束条件方程数；n 为变量数，一般 $m < n$，均为正整数；$Xj\,(j = 1, 2, \ldots, n)$ 为决策变量，a_{j_i}，b_i，c_j 是常数，统称为“模型参数”。若问题是求目标函数 $f(x)$ 的最大值，则可等价地化为求 $-f(x)$ 的最小值。

2. 非线性规划

在求解系统的最优化时，常会碰到很多不能用线性函数表示，而需要用到非线性函数来描述的优化问题。对于目标函数或约束条件中至少有1个是非线性函数的规划问题称为"非线性规划"。非线性规划的数学模型常写成以下形式：

目标函数：　$\min f(x)$

满足约束：　$g_i(x) \leqslant 0 (i=1,2\cdots\cdots m)$

$h_i(x)=0 \quad (i=1,2,\cdots,2p)$

式中　$f(x)$为目标函数；$g_i(x) \leqslant 0$ 和 $h_i(x)=0$ 为约束条件。求 $f(x)$极小可等价为求 $-f(x)$极大。

计算方法一般都用迭代算法，逐渐逼近所求的解。通常按约束条件分为无约束极值问题和约束极值问题2大类。无约束极值问题在非线性规划中占有重要地位，是许多计算有约束极值问题的基础。

(1)直接法　迭代中仅计算和比较函数值来逐步逼近最优解的方法。计算简便，但收敛较慢，只在变量较少时才适用。常用的有鲍威尔法，单纯行调优法和模式搜索法。

(2)间接法　特点是在迭代中需要计算目标函数的一阶或高阶导数。常用以梯度法为基础的最速下降法、牛顿法和变尺度法等。

3.动态规划

研究决策过程最优化问题的数学规划。由于决策过程常常可以离散化为多个决策阶段，故又称多阶段决策。

动态规划基本概念包括：

(1)多段过程　系统决策过程按时间或空间划分成相继的阶段。若阶段数有限，为离散决策过程。若阶段数无限，为连续决策过程。

(2)系统状态　系统在某一时刻所有特性的总和称为"系统状态"。描述状态的变量称"状态变量"，常用矩阵表示段的状态变

量,每个阶段都有若干个可能的状态。若状态是确定的,就称为“确定性动态规划”,若是随机的就称“随机性动态规划”。

(3)决策 在过程的某个阶段,当状态确定后采取合适的决定,使下一阶段的状态按照需要的方式演变称为“决策”。描述决策的变量称为“决策变量”,各阶段的决策变量取值不同就得到不同策略,使全过程整体效益最好的决策称为“最优决策”。衡量全过程或若干子过程决策的优劣,通常用各阶段指标函数的相加或乘积来表示。

六、系统分析的应用实例

系统分析的核心是模型化、最优化。在有风险和不确定性的条件下,决策不能靠主观判断,而要全面的、充分的理解问题,从系统分析的角度出发,以模型为工具进行实验探索,利用模型提供的辅助决策信息。辅助决策信息能够有效地帮助寻求最佳的解决方案,对决策者判断起很大参考作用。以下 2 个实例,有助于说明系统分析的应用。

(一)GOAL 整体优化土地利用配置辅助决策系统(general optimal allocation of land use)

该系统是 20 世纪 90 年代荷兰科学政策委员会针对欧洲农产品生产贸易经营管理问题研制开发出的系统分析软件。该系统在对一系列农业自适应技术发展过程进行量化的基础上,利用模拟模型对农产品生产流通与欧共体社会经济、环境策略之间的关系进行了沟通。模型内部包含 2 个内核:第一是动态作物仿真模型和地理信息系统。这一层次被用来估测地区代表性农作物的生产潜力。第二层是多目标线性规划模型,用一系列约束条件和 1 组目标函数作为线性规划模型的输入。模型的输出信息包括根据目标函数导出的优选策略,用以估测各个区域土地利用方案的优劣。

GOAL 系统在3个梯阶上运作。这3个梯阶是：

(1)作物生长级　使用作物生长仿真模型，评估主要作物的生产潜力。输入信息包括土壤特性、作物特性如物候期、光能截获、光合作用、呼吸作用、干物质积累及运转等。运作之后输出作物理论产量。

(2)产量评估级　本级的核心是专家系统，根据专家系统评估，确定实际可能作物产量。子系统的输入包括主要作物测算出的生产潜力、栽培管理制度、农场管理等。实际可能作物产量作为本级输出。

(3)土地利用级　根据线性规划模型选定土壤利用与作物布局。模型给出在欧共体范围内不同农业生态区农产品需求问题的优化种植方案。模型考虑的主要作物有小麦、玉米、糖用甜菜、马铃薯、牧草等。

(二)WMS 多媒体小麦、玉米管理系统

该系统是中国农业科学院于20世纪90年代中期，运用系统分析的原则，以作物生长模型为核心，研制开发的计算机软件系统。可帮助农业科学实验和生产管理人员从事小麦环境监测、土壤气候资源的开发利用和评价，小麦产量预测以及小麦水肥管理决策。并可向用户提供包括声音、图形、图像和文字的多媒体信息服务。它已部分实现数据录入的声音校对、实验结果采用可视化输出与静态图象彩色显示。主要功能如下：

(1)监测与评估

A.小麦、玉米生长发育动态监测；生产潜力和生产力分析、评估

B.小麦、玉米水肥管理模拟；土壤水分和氮素分析、评价与预测；灌溉、施肥方案推荐

C.小麦、玉米品种遗传特性评测

(2)咨询与决策　咨询与决策功能相当于提供一个小麦管理

决策计算机实验室。通过菜单选择和鼠标操作，可设计不同生产管理系统，获得下列主要管理决策信息：

A. 由目标产量推断的适宜管理

已知产量目标，给出特定地点和天气下的适宜品种遗传特性，最适灌溉日期、灌溉量、施氮肥日期、施氮肥量以及小麦—环境系统的状态（小麦生长发育状态、最终产量和产量结构、土壤水、氮动态等）信息。

B. 光温生产系统

给出特定小麦品种在特定天气条件下的最高生产力、小麦生长发育的理想动态、最终经济产量和产结构信息。

C. 雨育生产系统

设氮素不是限制因子，水分条件完全取决于降雨。给出特定品种的小麦在特定土壤水分和天气条件生产力、最终的经济产量和产量结构、土壤水分状况及土壤水分平衡各分量的逐日变化动态信息。

D. 自然生产系统

设水、氮受限制的自然土壤和天气条件下，不灌溉，也不施肥。给出特定品种的生产力、最终经济产量和产量结构、土壤水、氮平衡各分量的逐日变化动态和水、氮状况的评价。

第八章　农业气象学发展趋势与展望

第一节　面向21世纪初叶农业气象学的任务

一、农业可持续发展与农业气象学

环境与发展是当今国际社会普遍关注的重大问题。1994年6月联合国环境与发展大会在巴西里约热内卢召开。会议通过了《里约环境与发展宣言》、《21世纪议程》、《关于森林问题的原则声明》等文件,并签署了联合国《气候变化框架公约》、联合国《生物多样性公约》,充分体现了当今人类社会可持续发展的新思潮。中国总理李鹏率团出席了本次会议。1994年3月25日国务院第16次常务会议讨论通过了《中国21世纪议程——中国21世纪人口、环境与发展白皮书》,反映了我国对环境与发展问题的高度重视。该白皮书强调经济发展必须与环境保护相协调,走可持续发展的道路。

我国由于人口的压力、耕地的减少、淡水资源的紧缺,21世纪的农业面临着巨大的挑战。1998年10月中共中央《关于农业和农村工作若干重大问题的决定》中,提出了农业和农村跨世纪发展的目标和方针:不放松粮食生产,积极发展多种经营;实施科教兴农;实现农业可持续发展。

根据我国的国情,农业可持续发展必须保持农业生产率稳定增长,提高食物生产水平和保障食物安全;发展农村经济,增加农民收入;保护和改善农业生态环境,合理永续地利用自然资源。

农业气象学作为研究气象环境与农业关系的一门学科应该也

必须为我国农业可持续发展做出应有的贡献。

(一)农业稳定增长与农业气象

为迎接21世纪我国人口高峰的到来,解决好吃饭问题,在可开垦的土地有限的条件下,保持农业生产率的稳定增长是首要任务。太阳辐射能是农业生产的根本能源,提高光能利用率和光合生产效率是提高农业生产率的根本。目前,种植业光能利用率约在1%左右,如何将光能利用率提高到2%左右,是提高农业生产率的重要课题。提高作物光能利用率涉及到环境、生理、生态、农学多个领域,农业气象学能够发挥重要作用。首先,决定光合生产的是太阳辐射中的光合有效辐射或生理辐射。我国太阳辐射观测台站很少,更缺乏光合有效辐射的观测。目前使用的光合有效辐射资料多由总辐射观测资料通过经验公式计算而来,与实际情况是否符合,缺乏验证。对于光合有效辐射的时空分布、限制光合生产诸因素的分析,以及参数的确定等都缺乏深入的研究。因而计算出的光合生产潜力各家出入甚大,难以适从。农业气象学应在这方面进一步做出努力,并对我国光合有效辐射资源与热量资源、水资源、土地资源的错位问题做出科学的、统一的评价,提出提高光能利用的技术途径。

我国是个多灾的国家,每年因旱、涝、霜冻、冷害、冻害、冰雹、大风、干热风等气象灾害而减产的农田面积少则几百万公顷,多则几千万公顷,是造成我国农业产量波动的重要因素。我国每年因气象灾害损失的粮食高达320亿~380亿kg,每年因气象灾害造成的经济损失达到370亿~490亿元。防灾、减灾,保障农业生产稳定增长是农业气象学的又一重要任务。面对21世纪我国粮食生产发展的巨大挑战,农业气象学的任务任重而道远。

(二)发展农业多种经营与农业气象

发展农业多种经营是满足广大人民群众生活不断提高的需要,也是发展农村经济,治贫致富的重要途径。立足国内,放眼世

界，打破传统农业，向粮、经、饲、种、养、加综合生产的方向发展。引进国内外经济价值较高，需求较为广泛的经济作物、畜禽等，发展多种经营已是我国农业今后发展的大势所趋。再就是一些经济价值较高，需求量较大的野生经济动植物，如甘草，其自然生长已满足不了社会的需求，加以盲目采挖、捕捉，很多经济动植物濒临灭绝，也严重破坏了自然生态环境。变野生动植物为人工种植、养殖是今后发展的方向。各种野生经济动植物要求的气候生态环境各不相同，摸清其生长发育的生态环境是变野生为家养，扩大农村多种经营，达到高产高效的技术关键。我国农业气象学在过去很长一段时期只着重少数几种粮食作物农业气象问题的研究，而对大多数经济作物与气象条件的关系缺乏研究。对于野生经济动植物人工驯养、种植的农业气象问题研究更是很少涉及。而广大农民往往由于盲目引种而失败，不但给生产造成巨大损失，也会挫伤群众从事多种经营的积极性。面向21世纪，农业气象学要不断拓宽研究的领域，走在农业多种经营发展的前面，为国内外经济作物、畜禽引种、野生经济动植物人工种植、养殖提供技术保障。

发展农村多种经营还要立足于当地，充分发挥当地自然环境的优势，形成有特色，品质优良的农产品，以提高市场的竞争力。形成规模生产，向产业化方向发展，才能实现可持续发展。在这方面农业气象学也是大有用武之地的。

(三)保护农业生态环境与农业气象

气象条件是农业环境的组成部分。保护农业环境，农业气象学责无旁贷。

CO_2 和 CH_4 是重要的温室气体，其大量排放对全球气候变化将产生重要影响。而全球气候变化又会对农业发展产生巨大影响。广浩的农业生态系统是 CO_2 的“汇”。大量燃烧作物秸秆和农田废弃物会大量排放 CO_2。稻田和反刍家畜是 CH_4 的重要排放源。研究土壤—植物—大气系统中碳素循环和农业生态系统中

的碳循环，建立合理的农田物质循环系统是控制 CO_2 和 CH_4 等温室气体排放、减少环境污染的重要途径，也是农业气象学应予深入探讨的问题。

水土流失、风蚀、荒漠化也是我国与气象因子有关的农业环境问题。每年因此损失的粮食达20亿～35亿 kg。造成的直接经济损失高达60亿～90亿元。

防止农田侵蚀，保持水土对保护耕地资源、保障农业可持续发展有重要意义。防止农田风蚀、水蚀、沙化的各项环境工程是以其农业气象效应为依据的。有针对性地开展环境工程农业气象研究，对保护耕地、资源的持续利用有重大作用。

(四)合理、永续利用农业自然资源与农业气象

1.农业能源永续利用与农业气象

由于社会的发展，能耗的急增，能源问题日趋严重。如何解决广大农村能源永续利用，又防止环境污染逐渐被列入议事日程。

我国农村传统的能源是燃烧秸秆、木材，部分地区使用煤炭，其热能利用率极低，且造成大气环境的污染。随着农业机械化的进展，对石油的消耗迅速增加，农业逐渐成为耗油大户。同样存在能源的持续利用与尾气排放污染环境问题。探讨农业、农村能源的合理永续利用有重要意义。

太阳能、风能是可再生能源，且无环境污染问题，适于在农、牧区发展。既能解决农村生活用能耗，也可以部分做为农业生产中的能源，减少农业对石油、煤炭等不可持续利用能源的依赖。农业气象学可以为太阳能、风能在农业上的广泛应用做出区域评价，也可通过建立节能型农业试验示范区加以推广。

现在有些国家已在考虑开发“绿色能源”，即利用绿色植物(包括藻类)，通过光合作用将太阳辐射能转化为有机物，再通过生物技术将这些生物有机体转化成乙醇、沼气等，作为燃料解决农村能源问题。这种从太阳辐射能转化为生物潜能的能量转化过程基本

上是在常温常压下即可完成，又不存在像太阳能、风能利用中的蓄能问题，所以大有发展前景。其技术关键是筛选出具有高光效的“能源植物”，形成栽培体系，进行规模生产，并与能源工业相接轨，因地、因气候制宜地加以推广。在发展“绿色能源”中，很多环节农业气象学都能充分发挥其作用。

2.国土资源利用与农业气象

过去一谈到发展农业，多着眼于现有耕地和可开垦的土地资源的利用。但是由于我国耕地只13亿 hm^2 左右，可开垦的荒地更是有限，而每年因城镇、交通、工矿等发展占用耕地在所难免。近年我国政府虽采取了一系列保护耕地的措施，我国的耕地仍以每年28.9万 hm^2 的速度在减少。面对人口增长与土地减少的矛盾，只在现有耕地上做文章，难度越来越大。如果立足于整个国土考虑农业发展，即所谓靠山吃山、靠水吃水，则发展前景就大不相同了。我国国土面积居世界第三位，我国的气候资源也丰富多样，耕地之所以如此紧缺，主要是土地资源与气候资源、水资源的配合不协调。有些地区土地广阔，但气候恶劣或水资源紧缺。有些地区气候、水资源丰富，但缺乏适耕的土地，或为山地、丘陵，或为沙漠、沼泽。对这类国土的利用至今尚不被国人所关注。随着水面种植、养殖，无土栽培技术的发展与完善，广泛开发气候资源丰富而又缺乏耕地的国土，不失为21世纪我国农业发展的新途径。

3.水资源的永续利用与农业气象

中国是淡水资源紧缺的国家，多年平均水资源总量为28 124亿 m^3。每公顷耕地占有径流量为28 320 m^3，为世界平均值的80%，而人均占有量只有2 260 m^3，还不及世界平均值的1/4。目前我国农业用水占可供水量的80%，是用水的第一大户。随着国民经济的发展，工业、城市生活用水将迅速增加，可供农业的用水将更加紧缺。走节水农业的道路是发展的必然趋势。

我国的水资源从根本上讲，主要来自天然降水，年平均降水总

量达 61 889 亿 m^3，其中 45%转化为地面和地下水资源，55%消耗于蒸发散。节水农业是一项系统工程，不仅包括节水灌溉技术，也与多项农业技术密切有关。它不仅针对灌溉农田，也包括旱作农业和雨养农业。包括灌溉农业与旱作农业、雨养农业的合理布局及比例。对自然降水、地面水、地下水统筹考虑，合理永续的利用是长远发展方向。

农田耗水中无效的土壤蒸发占相当大的比重。研究农田水分平衡和国土水分平衡，提高降水的保贮率，水分的利用率和利用效率，减少无谓的水分损耗是节水农业的关键，也是农业气象学应该不断深入研究、解决的重大课题。

二、农业现代化与农业气象学

1998 年 10 月 14 日中国共产党第十五届中央委员会第三次全体会议通过的中共中央《关于农业和农村工作若干重大问题的决定》中，一开头就明确指出：贯彻党的十五大提出的战略部署，实现我国跨世纪发展的宏伟目标，必须保持农业和农村经济的持续稳定发展。12 亿多人口，9 亿在农村，是我国基本国情。农业、农村和农民问题是关系改革开放和现代化全局的重大问题。没有农业的现代化就没有整个国民经济的现代化。

农业现代化是用现代科学、现代工业装备、现代科学管理方法改造农业的过程，是相对于传统农业而言。其基本特征是：科学化；机械化和电气化；社会化和商品化。走现代集约化可持续发展农业之路，以高产、优质、高效、低耗为宗旨。

（一）农业科学化与农业气象

由传统农业向现代化农业转变，由粗放经营向集约化经营转变，必然要求农业科技有一个大的发展，进行一次新的农业科技革命。农业气象学作为农业科技的组成部分，必须首先进行自身的技术革命，以适应我国农业现代化的进程。

进行农业科技革命首先要解决面向问题，也就是以什么标准来衡量科技成果问题。发达国家之所以拥有先进的农业科学技术，首先表现在农业生产过程中科技的贡献率和转化率上，目前他们的科技成果转化率在70%以上。而我国目前科技成果转化率还不到40%，而真正能形成规模生产的科技成果则只有20%左右。因此，提高我国科技成果的转化率是实现农业现代化当务之急。

在我国农业气象科技发展中，在相当长的一段时间强调其在农业科学中的基础性，着重于基本规律的探讨，对其实用性则重视不够。随着科研体制的改革，农业气象科技发展的重点开始向实用技术倾斜，注意实用技术的开发，取得了显著进展。但总的来说，农业气象科技成果的贡献率和转化率占农业科技总贡献率、转化率的比重还不够大。特别是重大农业科技贡献率更低。这主要不是农业气象学科本身性质所决定的，在相当大的程度上是由于为现实农业生产服务的观念尚不够强。很多研究成果从试验结果看是有效的，但缺乏可操作性，特别是与农业其他科技如何配合，纳入整个农业技术体系则更显欠缺。还有一些农业气象实用技术，在小范围实验中是可行的，但如何使之产业化，大面积推广，则缺乏技术服务体系，因而成为农民可望而不可及的新技术。

展望21世纪，农业气象学要想在农业科学化中发挥应有的作用，首先要瞄准国际上发达国家的科技动向，积极引进先进技术，努力创新；再就是要结合中国的实际情况，推出适合中国国情的实用技术，并使之产业化。

(二)农业生产社会化、集约化、商品化与农业气象

21世纪农业和农村经济发展将从小农经济自给性生产向社会化、集约化、商品化生产过渡。农业商品化生产要求形成一定规模的集中产品，便于商贸流通。而形成集中产区反过来又促进了农业生产的社会化。同时也有利于科学技术的推广应用。

近些年随着我国农业机械化水平的不断提高，很多农事作业如耕地、播种、收割、喷施农用药剂等正向社会化服务发展。以小麦收割为例，目前已形成数万计的联合收割机大军，打破省界、县界，按照小麦成熟期的早晚从南向北进行收割作业服务。这样既能充分发挥农机具的利用率，降低成本，又提高了劳动生产效率，争取了农时。还保证了收割质量，减少了因收割不及时造成的经济损失，是今后农业发展的方向。此外，林区应用飞机大规模飞播造林，沙区大面积飞播种草，飞机喷撒农用药剂防治病虫害、预防干热风等都已在生产中利用。随着生产发展和农业科技发展，这种社会化生产方式将越来越广泛。

形成农产品集中产区，首先要立足于当地自然资源，包括气候资源的优势。哪些地区适于发展什么，发展多少，农作物气候区划是重要的科学依据。再就是社会化大范围农业机具田间作业，要求有完善的农业气象服务体系作为技术保障。如机械化收割作业就要求有作物成熟期和作物生育状况的监测与预报，作业区农业气象条件的预报；飞机田间作业要求作业区天气条件的预报等以保障田间作业的质量，也便于农机具的合理调配，避免途劳往返。

农业集约化经营的一种重要形式是发展设施农业，工厂化生产。如利用塑料大棚、温室生产蔬菜、瓜果、花卉，工厂化养鸡、养猪、养牛、养鱼等等。也有半工厂化生产方式，如应用生物技术、组织培养等进行工厂化育苗，然后再移栽大田生产。随着农业工程、环境技术的发展，农业工厂化生产逐渐兴起。

有人认为，实施农业工厂化生产就不再受气象环境的影响了，其实不然。首先人工控制环境生产必须充分掌握农业生产对象生长发育对气象环境的要求，以达到高产、优质，生产周期短，能耗少，成本低，收效好的目的。

农业工厂化生产并没有改变作物光合生产的基本格局。所需的光、温、水、气如过多的依靠人工能源，势必成本高，而降低生产

效益,降低市场的竞争力。科学的方法是在充分利用当地气候资源的基础上,适当补充人工能源,以求得节能和高效。在这方面还有大量的农业气象问题须要研究。

(三)发展精确农业与农业气象

精确农业或精准农业是本世纪 90 年代在西方发达国家刚刚兴起的现代农业技术。它是以全球定位系统、地理信息系统、决策支持系统、遥感技术及自动控制农业机械为支持系统,根据农田作物生长环境条件和产量的差异性,因地块制宜地优化经营目标,实施目标投入,达到充分、合理地利用自然资源,保护生态环境,以最少的投入取得较高的产量和最好的经济效益,实现农业的可持续发展。可以认为精确农业是 21 世纪农业进入信息时代的一场农业技术革命。对我国今后农业技术发展也将产生重大的影响。美国明尼苏达大学实验结果,这种精确的管理较传统的大面积按同一标准管理农田可节省 1/3 的肥料投入,同时提高了产量,并且减少了因氮肥投入过多对环境的污染,经济效益也显著提高。这项技术也可以具体指导农田播种、灌水、防治病虫害等田间管理。90 年代在北京开始利用全球定位系统进行麦田灭蚜取得了成功,为我国发展精确农业迈出了可喜的一步。

气象环境是农业的重要环境因素。我国早在 80 年代就采用遥感技术掌握各地天气气候的变化。利用卫星遥感信息进行作物产量预报,取得了满意的结果。如将农业气象遥测遥感技术纳入精确农业技术体系,因地制宜、因天气气候制宜地进行农田管理,防御气象灾害,既丰富了精确农业的内涵,也将促进农业气象科技有一个新的发展。

(四)实现农业高产优质高效农业与农业气象

高产、优质、高效农业是一个整体概念,三者是相互依存、相互促进的。高产是指提高资源的产出率。没有产量,优质就没有基础。优质是指对农产品的品质要求,以满足广大消费者的不同需

要。没有优质,高产就失去意义。还会导致农产品的滞销和大量积压。高效是指在一定投入下能够获得最大的经济效益和生态效益。高产、优质是高效的必要条件。高效又反过来会促进生产者发展高产、优质农产品生产的积极性。90 年代我国做出发展高产、优质、高效农业的决定,标志着我国农业发展已由单纯数量增长向数量、质量并重转变;由传统农业向现代农业转变;由计划经济向社会主义市场经济的转变。在发展高产、优质、高效农业中农业气象学应该,也完全有可能发挥其作用。

在我国耕地有限的情况下,为取得农业特别是粮食的不断增产,主要的途径就是提高作物单位面积产量。为提高作物的单位面积产量,不同的学科有其不同的努力方向。就农业气象学而言,主要是充分利用当地的农业气候资源,发挥当地的气候生产潜力。其具体途径:①提高复种指数。目前我国复种指数大约在 156% 左右,如何在 21 世纪初达到 170%,就相当于多增加了 667 万 hm^2 以上的耕地。为提高当地的复种指数,首先要对当地光、热、水等农业气候资源进行科学分析,据此选择适宜的作物、品种和种植制度,充分利用可能的生长季。②提高光合生产率。对水田和灌溉农田而言,在生长季和供水满足条件下,提高作物光合生产率就成为取得高产的关键。③提高水分利用效率。对供水不足的灌溉农田、旱作农田、雨养农业,水分是制约农业增产的主要环节,在相同供水条件下,提高单位水量的经济产量就成为技术的关键。农业气象学应该在这些方面做出自己的贡献。

引进高产作物、高产品种是农业提高单位面积产量的重要途径。随着遗传育种、生物技术的进步,国际上正努力选育“超级稻”、“超级麦”等来解决农业发展问题。但这只是问题的一个方面。无论多么优良的品种都有一个生态适应性问题,只有适地适种才能充分发挥良种的特性。农业气象学如能与作物育种紧密结合,较快的做出良种生态适应性区划,对缩短品种区域试验年限,

加快良种推广，都有很大帮助。

农业气象学还可以通过对农业气候资源的分析，揭示各地限制农业发展的制约因素，为育种学家提供育种的目标。通过高新育种技术培育相适应的良种，以解决这些地区的农业增产问题。例如美国由于培育出早熟杂交玉米，使商品玉米产区向北推移了805 km^2；由于培育出抗寒力强的小麦品种，使冬小麦带向北推进了322 km^2。

随着国民经济的发展，人民生活水平的提高，人们越来越重视农产品的品质和质量，包括营养价值高、具有一定保健功能、具有特殊风味、无污染、无公害的“绿色”食品等。

作物的品质一方面决定于作物的种质，也与其产出地区的气候环境有密切关系。以小麦为例，小麦籽粒中蛋白质的积累与气候的大陆度有关。一个地区大陆性气候越强，小麦籽粒中蛋白质含量越高。因此，为了获得高蛋白质的小麦，应当选择比较干燥的地区种植。而为了获得适于酿造啤酒的低蛋白质含量小麦，就应选择夏季凉爽而又多雨的地区种植。较大的日较差有利于果品中糖分的积累，较强的辐射条件有利于果品的着色。根据各个地区的农业气候特点发展具有特色的农产品，有助于优质作物的发展。发展优质作物的另一途径是从国内外引进优质作物、品种。而作物引种的成败在很大程度上与气候环境有关。运用农业气候相似理论有助于引种的成功。

高效农业是以提高单位的投入产出比为衡量标准，而农产品的价格受市场供需所左右，所以发展高效农业应以满足市场的需求为导向。随着国民经济的发展，生活水平的提高，人们除对优质、有特色农产品扩大需求之外，更要求农产品的周年供应，特别是对一些难于长期贮存的新鲜蔬菜、瓜果、花卉等的周年供应。它有利地推动了高效农业的发展，同时也提高了对农业科技的要求。我国幅员辽阔，气候多样，南北之间、东西之间气候差异悬殊，具有

发展农业周年生产、周年供应的自然环境。特别是近些年铁路、公路、航空运输的快速发展,使得各地生产出的鲜活农产品可以很快运抵全国各地,既满足了人们的生活需要,也扩大了市场,提高了农产品生产与经营的经济效益。还可以利用我国地理的优势,扩大鲜活农产品的出口、外销、创汇。

为解决农产品周年生产、周年供应,过去多采用保护地生产。今后的发展趋势是逐渐向利用各地的纬度差、高度差所形成的季节差、气候差为主,再配合必要的保护地生产措施加以实现。目前海南岛已成为我国寒冷季节瓜、菜生产的重要基地。一些高寒地区的反季节栽培为解决我国沿海地区高温季节某些喜凉的瓜果蔬菜供应做出了不少贡献。但就全国而言,这种周年生产、周年供应还多限于一些大中城市,品种与规模也还有限。如何充分利用我国农业气候多样性和区域间气候巨大差异的优势,从宏观上做出规划,采用排开种植、反季节栽培与保护地栽培等多种手段相结合扩大蔬菜、瓜果、花卉等鲜活农产品的周年生产与供应规模,同时从具体的生产环境调节控制技术方面加强指导,对搞活我国农村经济,提高生产效益,发展"三高"农业是大有文章可作的。这也对农业气象工作提出了新的任务。

综上所述,面向21世纪初叶农业的发展对农业气象学有广泛的要求。而农业气象学为要能跟上农业发展的趋势,以自己的科技成果,满足生产发展的需要还须做出巨大的努力,可谓任重而道远。

第二节 相关科技发展对农业气象学的推动作用

农业气象学其本身就是农学与大气科学、环境科学的交叉学科,涉及的相关学科十分广泛。而数、理、化、天、地、生等是农业气

象学的基础学科。这些学科的发展将与农业气象学产生很多交叉点，这种学科间的交叉渗透对农业气象科学发展有很大的推动作用。特别是21世纪，信息技术、生物技术、自动化技术等的飞速发展，必将推动农业气象学以崭新的面貌快速发展。

一、相关学科交叉渗透对开拓农业气象学广度和深度的作用

就农学发展对我国农业气象学的影响而论，在计划经济时代农业发展局限于种植业为主，粮食生产为主，仅着眼于单纯数量的增长。因而当时我国农业气象学研究也多局限于粮食作物农业气象问题的探讨。改革开放后，我国农学研究转向农、林、牧综合发展；以高产、优质、高效为目标，探索农业可持续发展的途径。在此影响下，我国农业气象学研究的领域也相应得到拓宽。除粮食作物外，各种经济作物的气象研究，畜牧气象、林业气象、渔业气象等相继发展起来。

在研究的深度方面，由于相邻学科的相互渗透对农业气象学也有不小的推动。例如，20世纪80年代以来农业生态学向农业气象学渗透的结果，我国农业气象学开始把农业对象、农业生产过程和它们赖以生存的气象环境作为相互依存、相互作用的统一体，研究土壤—植物—大气系统中能量的转化和物质循环。从农业生态系统能量平衡、水分平衡探讨农业的合理结构，使农业气象研究深入了一步。

近些年国外学者发现在植物生活环境中存在某些细菌具有冰核活性，能影响植物的抗寒力。经我国农业气象学和细菌学科技工作者合作研究证明，在我国同样有冰核活性细菌的存在；接种冰核活性细菌的作物较没有冰核活性细菌的同种作物其细胞内结冰的温度显著为高，容易遭受霜冻的危害，从而丰富了人们对作物霜冻的认识。对防御作物霜冻的方法也跳出了单纯用增温、熏烟、灌水、覆盖保温等物理方法防霜冻的框子。已经找出能抑制冰核活

性细菌的药剂和消除冰核活性的方法,用以防御作物霜冻,这是细菌学研究进展向农业气象学渗透的例子。现在人们正在研究利用冰核活性细菌的这种特性作为人工降雨、人工降雪的催化剂,为农业生产和国民经济服务。人们还在研究采用生物技术生产具有强冰核活性的细菌、喷洒在害虫的身体上,用以降低农业害虫的抗寒能力,消灭越冬害虫,且无公害。

再举一个农业气象学研究进展向其他学科渗透的例子。80年代我国为防御作物干旱,利用某些高分子化合物在植物叶面成膜的原理,研制抑制蒸腾剂。在此过程中发现某些膜剂不但有抑制蒸腾的功能,还有抑制某些病害发生的效果。经与植物保护学家共同研究,证实了这种膜剂的防病功能,研制出了防病膜剂,并在生产中得到应用。以后又在此基础上研制出果品保鲜剂,在果品贮运、保鲜中得到应用,取得了满意的结果。

现在在农业科技中生物技术正在成为热门话题,并可能在21世纪农业发展中发挥重大作用。探索生物技术与农业气象学的交叉点也是发展农业气象学的重要方面。科学家有可能通过生物技术培育出较现有品种生育期更长或更短的品种,或具有各种抗逆性(如抗低温、高温、干旱等)品种,因而改变了这种作物的适种区域。农业气象学家可以通过农业气候分析,很快的为这些品种找到适宜的发展区域。农业气象学家也可以根据我国各地农业气候特点,向育种学家提出育种方向的建议,通过培育适宜的良种,做为充分利用当地农业气候资源的手段。这种相邻学科间的相互结合,相互渗透对两个学科的发展都有很大作用。

气象学发展对农业气象学发展的推动作用更是显而易见的。现代农业气象学是在现代气象学基础上,作为应用气象学的一个分支发展起来的。现代农业气象学所依据的很多基本理论、研究手段、研究方法乃至基本数据大多来自现代气象学。注意从气象学发展中不断吸取新理论、新方法、新成果,用于农业气象研究和

业务服务对农业气象学的发展与提高是大有益处的。

从20世纪90年代到21世纪初我国气象事业正在向现代化方面迈进：

在国家、区域、省、地、县5级预报系统现代化建设方面，已经引进了银河－Ⅱ巨型计算机，开始开展中期数值天气预报新业务，延长了预报的时效，提高了预报的精度，增强了对灾害性天气预报能力。在天气预报基础上发展起来的农用天气预报、农业气象灾害预报其预报的准确性、时效性也将相应有很大的提高。

在大气监测自动化系统建设方面，将完善中国基准气候站网，全面进行大气质量本底监测，改进地面、高空观测站网探测能力。增强对灾害性天气和气候变化的监测能力，特别是对目前观测资料稀少区域的监测能力。这不但会增强我国农业气象灾害的监测能力。推动气候变化对农业影响的研究进程，而且对国土农业气候资源的研究也会带来好处。

建立气象卫星监测应用服务系统。发展静止气象卫星和极轨气象卫星，并实现气象卫星监测应用业务化，以增强对大气结构和气候监测能力。我国气象卫星遥感监测系统在对大面积水旱灾害、森林火灾的监测中发挥了很大作用，利用卫星遥感进行农作物产量预报达到了很高的精度。这方面科学进展有力地促进了农业气象现代化。

而以卫星通信为主气象通信网和网络化计算机信息处理系统的建设，将实现气象观测资料的快速收集、存储和信息共享。这对农业气象研究、业务开展及为农业生产服务带来了方便。全球气候变化是举世关注的重大环境问题。全球气候变化对中国生态、气候、地理系统和社会经济系统将产生长期巨大的影响。在国民经济中农业是受气候变化影响最大的产业部门，因而全球气候变化对农业的影响也就成为农业气象学着重研究的课题。全球气候变化的研究进展将直接影响农业气象学在这一研究领域的进展。

中国是农业大国，在农业生产过程中产生的温室气体对全球气候变化将产生重要影响，因此全球气候变化研究又要求农业气象学对此提出相应的对策。

从20世纪90年代开始启动的全球气候变化研究已取得重要进展：做出中国21世纪区域情景评价；中国21世纪气候变化对生态、气候、自然地理和社会经济系统影响评价；经过实验提出中国21世纪气候变化适应对策和减缓对策，包括技术和方法等。为从农业气象角度对这一领域研究奠定了有力基础。21世纪即将到来，不断检验这些评价与对策的准确性和现实可行性，使之在今后农业发展中付之实施已迫不容缓。

由于农业气象学科的性质，相关学科十分广泛，只要我们密切关注相关学科科技进展，及时加以引进、消化、吸收，对农业气象学的发展是大有裨宜的。

二、技术学科发展对改进农业气象学方法和手段的作用

技术学科包括电子计算机技术、遥测遥感技术、信息传输技术、自动化技术等是当今发展最快，对科学发展影响极为深远的工程技术领域。自从将这些技术引入农业气象领域，已对农业气象学发展产生了巨大影响。随着这些技术学科日新月异的飞速发展，对今后农业气象学发展的影响更是难以估量。

(一)农业气象观测向自动化发展

进行农业气象观测，取得作物(畜禽)生长发育与其周围气象环境的数据是开展农业气象研究、服务的基础。

过去很长一段时间，农业气象观测都是用目测或人工观测，不但费时费工，而且观测的内容、项目、次数受到限制。分析作物与气象关系时，总是感到数据资料不足。再就是农业气象台站网点和农业气象试验点少，与我国辽阔的幅员和复杂的农业气象条件不相称。

农业气象要素观测引入自动化技术、遥测遥感技术后，观测自动化水平有了很大提高。其中气象要素观测自动化程度较高，对作物、畜禽生育期、生长状况、产量等农业项目观测的自动化还有待进一步解决。目前利用遥感技术对大范围作物生育状况观测已取得良好进展。实现农业气象观测全面自动化是今后努力的方向。

利用遥测遥感技术监测大范围农业气象灾害发生、发展情况，有利于及时作出防灾减灾的决策。

森林火灾的发生与气象条件有密切关系。利用卫星遥感能对森林火灾的发生、发展进行有效的监测，特别是对一些边远地区、人迹罕见地区森林、草原发生的火灾监测，更能及早发现、及早采取措施，防止火灾蔓延。

遥测、遥感，自动化观测、监测系统随着技术性能的提高，在农业气象观测、监测的应用中将越来越广泛，能有力地推动农业气象学现代化的进程。

（二）农业气象资料存储与检索能力大幅度提高

开展农业气象研究、农业气象业务和服务需要大量的农业气象资料：站点要有一定的密度；每个站点要有较长的资料序列；加上观测项目多，观测次数多，产生的信息量很大。过去农业气象数据多制成报表，分项目，按瞬时值、日值、月值、年值、多年平均值统计，编印成册。使用时，再花费大量人工从表报中摘录，不仅费时、费工，而且往往不能及时获取所需的观测资料。

自从大型电子计算机问世以后，以其巨大的信息存储能力，解决了大量农业气象数据存储问题。而且检索快速、方便。使用任何站点、任何数据时，只须通过电脑终端发出指令，即可完成快速检索并打印出来。

随着信息网络的发展，特别是国际互联网的发展，国内、国际间的农业气象数据库可以联网。用户可以通过互联网从任一数据

库检索所需的农业气象资料，为农业气象学发展创造了良好条件。

(三)农业气象数据处理能力增强

农业气象越向广度、深度发展，时常涉及到复杂的理论计算。人工计算往往难以胜任，因而限制了理论的深入探讨。于是人们采用运算较为简便的经验公式或半经验公式代替。这样势必降低研究结果的精确性或适用范围。各地利用不同经验公式，或采用不同参数计算出的结果就失去了其相互的可比性。

电子计算机的广泛应用，软件越来越丰富，使得复杂的运算迎刃而解。这样不仅节省了科技人员的宝贵时间，而且有可能向农业气象理论深度探索。

农业气象研究中另一项繁杂的数据处理是制图，包括农业气候图、要素分布图和相关关系图等。人工制图费工费时，有时还受主观因素的左右。利用电子计算机制图既快捷，又客观。过去在编制农业气候资源分布图时，由于站点数量有限，只能做粗线条分析，很难考虑地形、地貌的影响，一些缺乏实测资料的地区只好用虚线示意。而利用卫星遥感和地理信息系统就可以弥补站点稀少的不足，并能绘制出精度较高的农业气象要素分布图。

(四)提高了农业气象实验能力

在农业气象研究中多采用田间实验，平行观测的方法，以确定气象与农业的关系。可是由于有些气象因素如霜冻、干热风等在自然条件下其发生的时间、强度、区域很难掌握，因此很难在自然环境中获得理想的数据。还有像农田防护林，不同结构林网的气象效应研究是营造农田防护林的根据。人们很难在自然条件下创造典型结构进行研究。于是人们求助于人工环境进行农业气象实验。人工环境的实验装置如人工光照、人工霜箱、风洞等发展起来。控制的要素由单项向多项综合调控发展，如人工气候箱、人工气候室开始用于农业气象研究。这些人工环境实验装置模拟农业气象条件的能力随着电子计算机技术、自动化技术的发展在不断

提高，为获得准确的农业气象研究结果提供了技术保证。

大功率电子计算机的出现，人们已经可以在计算机上进行大规模农业气象数值模拟试验，如全球气候变化对不同地区可能产生的影响等。

(五)提高了农业气象文献检索与信息交流能力

农业气象研究、教学为能赶上时代发展的步伐，须要经常了解国内外本学科及相关学科领域的研究进展，从中获取有益的信息或启迪。书本式的文献、索引限于人力和条件，文献收录面受到限制，时效性也不够。人们为了获取所需的科技信息要花费很多时间翻阅各相关学科的索引、文摘，效率很低。

技术科学的进步，大功率电子计算机的应用，很多国家建立了多学科的文献信息库。人们可以在电脑终端通过信息网络向各信息库检索所需的文献。不但快速、便捷，而且十分及时。目前我国的文献信息网络也正在建设。它使得国际、国内农业气象科技工作者之间缩短了时空距离。促进了学术的交流，对农业气象学发展起到了良好的推动作用。

第三节　面向21世纪初叶的农业气象学展望

面对即将到来的21世纪农业的发展、科技的进步、研究手段的现代化，农业气象学将会以崭新的面貌迎接新世纪的挑战。

一、农业气候资源的高效开发、利用与保护

农业气候资源是农业发展的基本条件。21世纪在人口增长的压力下，农业必须稳定持续发展，因而对农业气候资源的利用也要求更加充分。无论是解决农业可持续发展问题，还是解决农业高产、优质、高效问题；无论是农业社会化生产，还是走“精确”农业

道路，集约化经营，都要以当地农业气候资源为主要依据。就是国内外良种的引进和推广，也需要以农业气候相似理论为指导。

20 世纪 80 年代我国从全国到省市以及多数县都进行过农业气候资源的分析与区划。但限于当时站点、资料、手段等多种因素的限制，上述工作多是粗线条的，面对 21 世纪农业的发展显然已不符合需要。须要开展更加详实的农业气候资源分析与评价，提出更加具体的开发利用方案。

未来年代，开展农业气候资源分析较 20 世纪 80 年代，条件有了很大的改善。气候站点在增加，资料序列在延长；已形成全国气候资料信息库；已形成全国的信息网络系统；特别是大功率电子计算机的广泛应用，已经能做到大量数据的自动化处理和作图，为开展农业气候详细普查创造了良好的条件。再就是卫星遥测、遥感技术、地理信息系统的发展与引入，有可能对农业气候资源的分析精确到田区。在此基础上完成的农业气候资源分析，如资源的分布、特征、生产潜力的评估将会十分详实，有助于提出更加切实可行的开发、利用方案。

在对全国、省、县农业气候资源进行精确分析的基础上，就可以建立各级农业气候资源信息库。各级农业部门、农户只要根据全球定位系统确定农业开发的具体方位，就可以通过信息网络系统从农业气候资源信息库调出所需要的农业气候资源信息，以便因地制宜地开发、利用。

未来年代农业气候资源开发利用的着眼点也会有所拓宽。人们不仅着眼于现有耕地上农业气候资源的开发与利用，还将拓宽到整个国土上农业气候资源的开发与利用。特别是选择那些农业气候资源优越而又缺乏适耕土地的地区，或是水面，或是沙地，或是丘陵，可以因地制宜地采用水培、无土栽培等手段发展农业生产。既弥补了我国耕地的不足，又充分发挥了气候生产潜力，活跃了农村经济，其发展前景是十分可观的。

21世纪农业气候学研究的一个重点是中国与世界各国农业气候相似的研究。农业生产越发展，走社会化、商品化经营的道路，越需要从国际上大量引进新的作物与品种，以适应国际、国内对农产品广泛的需求。人们可以应用农业气候相似的研究成果，从当地农业气候特点出发探索从世界各地引进适宜种植的有经营价值的作物、品种。也可以帮助人们将引进的作物、品种尽快地找到在我国适宜发展的区域。

21世纪农业气候学研究的另一重要方面是各种蔬菜、瓜果、花卉周年生产、反季节栽培的农业气候研究。近几年我国农产品市场已初步显现出对各种新鲜蔬菜、瓜果、花卉周年需求的旺盛势头。农民为了追求较好的经济效益也正在力求通过发展保护地栽培、反季节栽培等手段来进行周年生产，以满足市场的需要。这种生产在一定程度上带有盲目性、自发性，缺乏科学的指导。虽有不少成功的事例，也不乏失败的教训。面向21世纪，随着城乡经济的日益发展，人民生活水平的提高，这种自发性生产已不能适应社会广泛的需求。根据我国各地农业气候资源和特点，对各种蔬菜、瓜果、花卉等作物周年生产、周年供应进行农业气候研究，做出区域间排开生产、分期供应的气候区划，既能发挥各地农业气候资源的优势、减少了能耗，又引导和保护了广大农民多种经营的积极性，是推动农产品周年生产、反季节栽培重要的农业气候课题，而这项研究又必须建立在对全国农业气候资源精确研究的基础上才得以圆满完成。

二、社会化、专业化农业气象灾害防御体系的建立

防御农业气象灾害对保障农业稳产、高产有重要意义。旱涝、霜冻、冻害、冰雹、冷害、干热风等是我国农业上经常发生、受灾面积较大，危害较重的气象灾害。近些年来对这些农业气象灾害曾开展过大量的研究，包括这些灾害的发生规律、为害指标、防御途

径和措施等,研究出一些防灾的手段和药剂。农业气象业务部门在农业气象灾害监测、预报方面也取得了不小的进展。但在大面积农田上如何实施有效的防灾措施,尚未很好解决。一方面很多气象灾害在发生时间上有突发性,在发生区域上有不确定性。另一方面,一家一户的农业生产,遇到气象灾害突然发生时,很难采取有效的对策。

21世纪随着科技进步,对农业气象灾害的预报将更加准确,预报的时效性将得到提高,农业气象灾害的监测系统将日益完善。农业生产的社会化、集约化,为大面积防御农业气象灾害创造了良好的条件。因此,社会化、专业化农业气象灾害防御体系的建立应是预料之中的事。目前,我国很多地方已在开展人工影响天气,防御气象灾害的业务。如用飞机在云层喷洒凝结核进行人工增雨;发射防雹火箭进行人工消雹。有些地区采用飞机喷洒药剂的方法预防小麦干热风。这些作业虽然取得了一定成效,但由于都是由行政业务部门组织的,受管辖范围的限制,各自为政,且能力有限,业务种类不多。平时作业不多,设备闲置,一旦灾害大面积发生,临时组织人员、装备上阵,又感到力量不足,难以应付。

新世纪的农业气象灾害防御体系应是跨省市、跨地区的社会化防灾服务体系。它可以集中一批有经验的科技人员,设置较为先进、较为齐全的农业气象灾害预防与监测系统,并与气象业务部门联网。装备一批机动性强、功效高的防灾设备,如农用飞机、专业用汽车、必要的技术装备和药剂。一旦接到防灾任务,就可以及时赶到作业地区,投入防灾行动。这种社会化作业不受行政区域约束,不同季节可以有不同的作业重点,所以作业量大,设备的使用率高,因此可以大大的降低作业成本。再就是这个体系是专业化的,技术力量强,经验丰富,操作熟练,作业效率高,投入少,收效大,有利于广泛使用。鉴于我国地域辽阔,可根据不同地区主要农业气象灾害的种类,在全国设置几个中心,各有侧重,必要时也可

以相互支援，实行联防。

为了不断提高防灾体系的业务水平和作业效果，反过来又要求加强对各种气象灾害的研究，不断探索防灾的新技术、新方法，推动农业气象灾害的研究。

社会化的防灾作业需要大量机具、药械，又会带动一批相关企业发展，因而有可能形成相互促进的高科技业务－企业集团。

三、农业小气候调节与农业环境工程在设施农业、工厂化生产中广泛应用

随着国民经济的发展，人民生活水平的不断提高，人们对食物的需求日益多样化，对各种蔬菜、瓜果、花卉、肉、蛋、水产等农产品要求周年供应。设施农业，工厂化生产迅速发展起来。在大田生产中，人们为了争取季节，提高复种指数，也越来越多的采用地膜覆盖、温室育苗移栽或作物生产后期利用塑料大棚延后栽培等方法，延长作物生育期和供应季节，提高单位面积产量和效益。

设施农业、工厂化栽培要求对生产环境进行控调以符合农业生产的需要。现阶段由于保护地生产多为农民个体经营，受技术和资金条件限制，这些设施的环境调控多为凭经验人工操作，单项环境控制。一些农业设施小气候环境控调的科研成果只在部分产业部门应用，与国际先进水平有较大差异。进入 21 世纪，设施农业、工厂化生产进入社会化、集约化生产阶段，生产规模在扩大，生产的作物、畜禽的品种在增加。从高产、高效、低耗出发，对科技的要求日益迫切，对农业设施环境调控的要求越来越高。其发展趋势如下。

(一)充分发挥当地的资源优势如光、热(包括地热)、水和风，发展节能、节水型设施农业

设施农业，特别是种植业生产，对光、温、湿度等主要气象素的要求较高，完全依靠人工能源生产，耗能多，成本高，不利于商品竞

争。充分发挥当地气候资源优势的基础上，适当补弃人工能源，弥补自然资源之不足，既满足了生产需要，又能节约开支。在光能和风能充足地区利用太阳能、风能发电，用于设施生产，可节约部分能耗。在设施农业中广泛应用先进的节水灌溉技术也是设施农业发展趋势。以上这些都有利于农业的可持续发展。

(二)向多要素自动控制发展

生产集约化要求对农业设施环境的调控进一步科学化，对设施环境调控的要素，根据生产对象的需要由单要素向光、温、空气湿度、土壤湿度、CO_2 浓度等多要素调控方向发展。由人工调控向自动化调控发展。由衡定指标调控向变动指标调控发展，即根据生产对象要求，进行实时变幅自动调控。生产者根据生产对象的生物学特性，预先设定不同发育期各环境要素优化调控方案，通过电脑进行自动化调控。

(三)设施农业由单一生产向复合生产发展

为维护农业设施内生态环境平衡，防止环境污染，设施农业开始由单一生产向复合生产发展，如菜畜共养、果菜共养等，使设施生产形成生态平衡，防止废弃物的污染，同时也提高了农业设施的利用率，提高了经营效益。进行复合式生产一方面要求设计者尽量筛选出具有相近环境要求的共生作物、畜禽，或生态互补的作物、畜禽，同时在环境调控上要照顾到复合性生产的特殊需要。

四、农业气象学在区域农业综合发展中将作出新的贡献

我国中低产田约占全国耕地的 2/3，主要分布于黄淮海平原、三江—松嫩平原、黄土高原、北方旱区、南方红黄壤区。这些区域是我国农业资源的富集带，但是由于旱、涝、碱、土壤瘠薄等因素的制约，成为这些地区农业发展的主要障碍因素。为求得农业的可持续发展，经多年研究，已经明确，应走农、林、牧多元结构，综合发展的道路。

区域农业综合治理是以各个区域农业气候资源合理开发利用为前提，努力克服障碍因素，以求得气候—土地生产潜力的充分发挥。在农业系统内部，力求种植业、养殖业、林果业等结构合理，生态系统能流、物流良性循环。

在区域农业治理中涉及农业气象学的问题很多，如农业气候资源的区域评价；气候生产潜力的评估与开发途径；与气象因素有关的主要障碍因素的分析及对策研究；土壤—植物—大气系统辐射平衡、水分平衡等。因此，我国农业气象工作者自 20 世纪 80 年代开始就广泛参与了黄淮海平原、三江平原、黄土高原、北方旱区、南方红黄壤区农业开发与治理，取得了大量成果。中低产区农业综合治理，可持续发展是一项长期而艰巨的任务。须在不断的生产实践中对以上研究成果进行检验；对制订的模式进行修订、深化；对提出的一些治理途径与技术，在广泛生产中改进和提高。

展望 21 世纪由于科技进步、电子计算机数值模拟、信息技术、遥感监测、地理信息系统等在区域综合治理中的广泛应用，无论在研究方法上，成果应用上都将进一步深化。农业气象学在今后农业区域治理中仍将继续发挥其专业作用。

五、农业气象基础研究应向业务化发展

农业生产对象与气象条件关系的研究是农业气象最基础的研究。它是农业气候资源利用、农业气象灾害防御、农田小气候改良、农业设施环境的控调、农业气象预报等各项研究与业务开展所不可缺少的基本数据。

由于农业的发展，生产领域的不断拓宽，农业生产的对象越来越多，就种植业来说就有粮食作物、经济作物、蔬菜、瓜类、水果、花卉、食用菌、药用作物、绿肥、牧草、饲用作物等。此外林业、畜牧业、渔业、蚕业、蜂业乃至野生经济动植物的人工繁殖驯养等等，种类繁多。再具体到作物、畜禽、林木的种类和品种更是十分浩瀚。

探索各种农业对象生长、发育、产量、品质对农业气象条件的要求,各农业气象要素对农业生产对象的影响,包括最适宜的或受害的指标,任务是十分艰巨的。面向21世纪农业的迅速发展,新品种不断出现;生产集约化对农业气象条件的要求越来越具体。原有的农业气象研究体制、设备、手段、方法已不能适应形势发展的需要。这是农业发展向农业气象学提出的新课题。

目前这些基本数据多出自育种或引种部门。这些部门受到学科、设备条件的限制,只从事与其育种目标密切相关的农业气象指标如抗寒性、抗旱性鉴定。而品种的气候适应性主要靠品种区域试验进行。受到区域试验范围和试验年份气候状况的限制,也很难得出确切的结果。而过去从事农业气象鉴定的农业气象部门,由于方法陈旧,设备、经费不足,多已放弃这项工作。个别农业气象研究单位虽具备一定的研究力量与设备也多着重本身承担的研究课题,无力广泛开展农业气象鉴定业务,成为当今我国农业气象学中的薄弱环节。为适应21世纪形势发展的需要,农业气象学要对这项农业气象基础工作给以足够的重视,利用高新技术探索出一套快速而又较为准确可靠的农业气象鉴定方法。再就是集中一定的技术力量,配备必要的设备,使之具备一定业务能力,使这项农业气象工作业务化,对客户实行有偿服务。这样既可满足生产的需要,又可系统积累各项农业气象基本数据,不失为可以探索的一条道路。

六、气候变化对农业影响的评价与对策研究将进一步具体化

由于人类活动,大量温室气体排放引起的全球气候变化及其对农业的影响是重大国际性环境问题,令世人瞩目。据政府间气候变化专门委员会(IPCC)估计,如果温室气体排放按目前趋势增长,那么到21世纪全球平均温度将以每10年0.2~0.4℃的速率升高,到2030年,估计全球平均温度将比工业化前升高2℃,变

化幅度为1.4～2.9°C，不同区域间将有所不同。大气中CO_2浓度增加、气温升高对农业的影响是多方面的。CO_2浓度增加将直接影响作物的光合生产，特别对C_3作物光合生产有利，对C_4作物的作用不大。温度升高对生长期有限的作物可缩短其生殖生长而减产，对无限生长的作物则有利；温度升高，作物生长季将延长，这对热量不足地区是有利的，而在温暖地区则不一定有利；作物复种指数理论上将可以提高，但受制于水、肥的满足程度以及病虫等灾害的发生情况；在降水不变的情况下，气温增高，蒸发加强，农田耗水增加。年平均温度每升高1°C，蒸发量大约增加5%，这在水分供应不足的地区将加重旱情；在水分供应充足的地区也会增加耗水量。气温升高在高温季节将对作物产生热胁迫。极端高温日数增加，对作物产量不利；平均温度升高也有利于某些病、虫、草害的发生、发展。气候变暖会引起冰川、冰盖溶化，海平面升高。据IPCC估算，到2030年，海平面将上升9～29 cm，一些低海拔农田将被淹没，沿海地下水含盐量将增加，这都将对农业产生影响。气候变暖使得作物种植界限、作物潜力极向迁移，从20世纪90年代到2030年，每10年约为150 km^2；而每变暖1°C，作物垂直气候界限将升高150 m。由于作物气候界限的变化，各地气候资源与土地资源、水资源将出现相互间的配合错位，进一步影响农业生产。因此全面、综合评价全球气候变化对农业的影响，特别是对不同地区可能产生的影响是十分复杂的。

我国从20世纪80年代以来，开始从事气候变化对我国农业影响及对策研究。基本上是以21世纪中叶大气中CO_2含量倍增为前提，加以分析和判断。近些年加强了数值模拟试验，取得了一些研究进展，明确了：温度升高、作物发育加快、生育期缩短是我国各季水稻产量下降的主要原因；小麦生长期内水分供应降低造成的产量降低效应远高于温度和CO_2浓度升高所产生的正效应；玉米生育期普遍缩短，全国玉米总产量将下降3%～6%；气候变暖

有利于我国棉花生产;长江以北地区潜在生长季延长,多熟种植北界向北推移,复种指数将会提高。我国是农业大国,农业自然环境复杂多样,气候冷暖、干湿,地势高低差异悬殊。农业类型,种植制度、熟制,作物种类品种繁多。未来气候变化究竟能对我国不同区域农业产生什么影响,至今还存在着很多不确定因素。面对全球气候变化对农业的多种影响和中国农业的多样性、复杂性,我国农业气象学家还须不懈的努力,以求做出全面而综合的评价,并提出相应的对策。如果对这些问题把握得比较准确,可以起到未雨而绸缪的作用。麻痹大意,将会造成重大灾难。因为很多农业对策不是一朝一夕就能发挥成效的。

从长远看,控制和减少温室气体排放是从根本上减缓全球气候变化的重要途径。农业包括种植业、养殖业、林果业及农副产品加工等是一个大的生态系统。在农业生态系统内存在着复杂的碳素循环。土壤—植物—大气间也不断进行着碳循环。良好的农业生态系统可以固定大量的碳素而成为碳素的“汇”。而破坏生态环境,造成生态恶性循环,将会加重温室气体的排放。加强农业生态系统碳素循环研究,努力探索既有利于发展农业生产又能有效地控制和减少农业生产中温室气体排放的对策,提出切实可行的技术途径,将我国农业的温室气体排放控制在一定水平上,也将是今后农业气象学努力实现的一个目标。

七、农业气象信息服务体系的建立

21 世纪将进入信息时代,在此形势下,农业气象学应充分开发本学科的信息资源为现代化农业生产服务。农业气象信息服务体系包括:农业气象数据库、农业气象知识库、农业气象文献库、农业气象专家咨询服务系统等方面。

(一)农业气象数据库

无论农业气象研究还是为农业生产服务都需要大量的农业气

象数据。因此农业气象数据库是重要的基础建设。21 世纪由于电脑的普及、信息网络的逐渐完善，大功能存储计算机的广泛应用，建立从中央到地方相互联网的农业气象数据库是完全可以实现的。数据库的内容应包括逐年、逐月、逐日各农业气象要素平均值、极端值，如太阳辐射、日照时数、气温、空气湿度、地面和耕层地温、土壤湿度、风向、风速、初终霜冻日期、各界限温度的初终日期和积温、主要作物各发育期的始期和普遍期等。用户只要通过信息互联网就可以获得所需的农业气象数据资料。

(二)农业气象知识库

现代化的农业需要不断地提高科学技术含量，提高广大农业科技人员、农民的科学技术知识水平，普及农业气象知识也是其中的一个方面。

现实的农业气象知识普及除通过教学途径外，主要是编印书本式的农业气象科普读物。由于印数有限，发行渠道不畅，真正需要农业气象知识的人往往看不到这些书籍，甚至也不知道能从哪里获得这些知识，因而达不到预期的目的。当前电台、电视台也组织播发一些农业气象知识节目，但限于播放时间，只能选播一些带普遍性的题目，还解决不了广大基层农业干部、广大农民对农业气象科普知识的广泛需求。只能是我播什么你听什么，还做不到我想知道什么就能学到什么知识。农业气象知识库的建立正是为了弥补这方面的不足。

农业气象知识库的内容可包括：农业气象学术语的基本概念、各种农作物、畜禽生长发育要求的农业气象条件、农业气象灾害的指标、农业气候资源利用、农田小气候改良、农业设施环境控调、农业气象灾害防御、作物气象、畜牧气象、病虫气象、农业气象预报情报等方面的基本知识，录入计算机。也可以制成软盘、光盘等软件上市。在全国及地方建立农业气象知识库和知识咨询服务体系。农业科技人员、农户可以通过信息网络检索所需的农业气象知识，

也可以通过信息网络或电话向知识库咨询，由知识库负责答复。知识只有为广大群众所掌握，才能发挥无比的力量。

(三)农业气象文献库

农业气象文献库主要是为农业气象及相关学科的科研、教学、业务、开发服务，以提高农业气象科技成果的利用率、转化率为目标。

农业气象文献库广泛收集现时出版的农业气象论文、著作、科研成果的简介，存储于农业气象文献库。人们可以通过全国信息网络从农业气象文献库检索农业气象文献目录、文摘、内容，复制所需的资料。

现在的出版社、期刊编辑部多已改手工排版为电脑录入。因此，出版软件比出版书本式著作还要方便。农业气象文献库只要能建立完善的文献收集渠道，广泛收集、系统存储于文献库大型计算机内，并接通互联网，即可实现网上服务。

现在国际上各学科的文献库已普遍建立，早已实现国际间文献检索业务。我国在这方面还比较落后。而建立我国的农业气象文献库，尚须依靠我国农业气象学界的人士共同努力加以实现。

(四)农业气象专家咨询服务系统

将有较大成就的农业气象学家的专长，按生产上重大专门问题或学科系统编制成专家咨询服务系统，供各级农业主管部门、生产企业及用户为解决重大农业气象问题服务。农业气象信息服务系统也可以应有关部门的要求，就生产中的重大农业气象问题组织有关专家会诊，开展咨询服务。

建立农业气象信息服务体系是一项庞大的系统工程。动用的人力、物力和财力较多。但其功能和产生的效益是无法用金钱加以评估的。应在国家支持下，按产业化经营方式逐步组建起来。

参 考 文 献

[1]吕炯.农业气象学的目的和任务及其发展途径.地理学报.1955,21(2)
[2]刘汉中主编.普通农业气象学.北京:北京农业大学出版.1990
[3]程纯枢主编.中国的气候与农业.北京:气象出版社.1991
[4]程纯枢主编.中国农业气象工作四十年(1951~1990).北京:气象出版社.1993
[5]《中国农业百科全书》编辑部编.中国农业百科全书:农业气象卷.北京:农业出版社.1986
[6]信乃诠.我国农业气象科学及其发展前景.农业气象.1986(2)
[7]何光文等.中国农业气象科学的发展及其战略重点.国际农业气象学术讨论会论文集.1988
[8]A study on the weather - yield Simulation and model in China. Futang Wang, Acta Meteorolgica Sinica, 1990, 4(3)
[9]李世奎等.中国农业气候资源和农业气候区划.北京:科学出版社.1988
[10]中国农林作物气候区划协作组编.中国农林作物气候区划.北京:气象出版社.1987
[11]江爱良.橡胶树北移的几个农业气象学问题.农业气象.1983(1)
[12]竺可桢.论我国气候的几个特点及其与粮食作物生产的关系.地理学报.1964.30(1)
[13]贺菊美等.实用农业气象指南.北京:中国农业科技出版社.1989
[14]大后美保.农业气象学通论.北京:科学出版社.1965
[15]史密斯.农业气象学方法.北京:农业出版社.1981
[16]陶炳炎等.杂交水稻与气象.南京:江苏科技出版社.1983
[17]高亮之主编.作物气象生态译丛.北京:农业出版社.1984
[18]陈尚谟等.果树气象学.北京:气象出版社.1989

[19]崔读昌等.中国主要农作物气候资源图集.北京:气象出版社.1984
[20]萨鲍日尼科娃著 C A.小气候与地方气候.北京:科学出版社.1955
[21]翁笃鸣等.农田小气候.北京:农业出版社.1984
[22]北京气象专科学校编.农业气象观测方法.北京:农业出版社.1961
[23]冯定原主编.农业气象预报和情报方法.北京:气象出版社.1988
[24]张养才等.中国农业气象灾害概论.北京:气象出版社.1991
[25]陶毓汾等.中国北方旱农地区水分生产潜力及开发.北京:气象出版社.1993
[26]西北农学院主编.家畜生态学.郑州:河南科技出版社.1985
[27]宋兆民主编.中国林业气象文集.北京:气象出版社.1989
[28]李赋镐.作物群体光合产量的模型估算.北京农业大学学报.1981(2)
[29]周允华等.光合有效辐射(PAR)的气候学研究.农业生态环境研究.北京:气象出版社.1989
[30]王新谋.家畜环境卫生学.北京:农业出版社.1989
[31]冯秀藻、陶炳炎.农业气象学原理.北京:气象出版社.1991,75,79,87
[32]李明德.鱼类生态学.天津:天津科技翻译出版公司.1990.23~26
[33]王馥棠等.农业气象预报概论.北京:农业出版社.1991.308.360
[34]郑大玮等.气候变化对小麦生产的影响.见:邓根云主编.气候变化对中国农业的影响.北京:北京科技出版社.1993.263~280
[35]郑大玮,Harris D,Clark J A,灌浆期气温、穗温对高粱籽发育和产量的影响.见:《中国农业气象》编辑部编.国际农业气象学术讨论会论文集.1998.49~55
[36]杨柏松.水产气象.北京:农业出版社.1990.61~81
[37]王玉江主编.家畜环境生卫生学.北京:北京农业大学出版社.1990.4~39
[38]楼纯菊,吴复华.微生物的生态.北京:科学出版社 1988.121
[39]金善宝主编.小麦生态理论与应用.杭州:浙江科学技术出版社.1992.53~75
[40]Moteith J L, Squire G B, Time, temperature and germination of peral millet .Journal of Experimental Botany, 1982, 33(103):288~302
[41]邓根云等.小麦分蘖的数学模式及其在栽培和农业气象中的应用.农业

气象.2(4):13～19
[42]陈玉民等.中国主要作物需水量与灌溉.北京:水利电力出版社.1995
[43]Philip J R Plant water relations: some physical aspects. Ann. Rev. plant physiol.,1996,17:24
[44]石培华等.冠层一气温差监测和诊断冬小麦农田水分.中国农业气象.1995,16(2)。
[45]北京农业大学农业气象专业编.农业气象学.北京:科学出版社.1982.12
[46]邓根云主编.气候变化对中国农业的影响.北京:北京科学技术出版社.1993.9
[47]韩湘玲.提高作物水分利用率的农业技术研究进展.见:石元春等主编节水农业应用基础研究进展.北京:中国农业出版社.1995.12
[48]胡芬等.有限供水下冬小麦生态生理效应的田间试验.中国农业气象.1994,15(6)。
[49]刘昌明等.节水农业内涵商榷.见:石元春等主编节水农业应用基础研究进展.中国农业出版社.1995.12
[50]康绍忠.大气 CO_2 浓度增加对农田蒸发蒸腾和作物水分利用的影响.水利学报.1996,(4)
[51]王馥棠. CO_2 浓度增加对植物生长和农业生产的影响.气象.1997.19(7).8～13
[52]王修兰. CO_2 浓度倍增对大豆各生育阶段光合作用及干物质积累的影响.作物学报.1994.20(5):520～527
[53]董振国等.农田作物层环境生态.北京:中国农业科技出版社.1994.324～325
[54]韩湘玲等.作物生态学.北京:气象出版社.1991.82～83
[55]王修兰等. CO_2 气候变化与农业.北京:气象出版社.1996.7～96
[56]崔读昌主编.中国农业气候学.杭州:浙江科技出版社.1998.14
[57a]中华人民共和国农业部编.中国农业统计资料(1994).北京:农业出版社.1995.44
[57b]中华人民共和国农业部编.中国农业统计资料(1995).北京:农业出版社.1996.70
[58]Seeman J 等.农业气象学.北京:农业出版社.1984.21

[59]王修兰.太阳总辐射的分光测量及其能量分配.农业工程学报.1990,6(1):48～54
[60]侯光良,李继由,张谊光主编.中国农业气候资源.北京:中国人民大学出版社.1993.67
[61]程纯枢,王炳忠.我国的降水量变率.中国农业气候资源和农业气候区划论文集.北京:气象出版社.1986.141～148
[62]杜林博斯 J,卡萨姆 A H.产量与水的关系.FAO.1979.29
[63]高素华主编.两高一优农业气象问题研究.北京:气象出版社.1996.70
[64]崔读昌等.中国小麦气候生态区划.贵阳:贵州科技出版社.1991.64～96
[65]程纯枢主编.中国的气候与农业.北京:气象出版社.1991.133～140
[66]中国畜牧气候区划协作组编.中国牧区畜牧气候.北京:气象出版社.1988.151～175
[67]竺可桢.中国近5000年来气候变迁的初步研究.中国科学.1973(2):291～296
[68]叶笃正,陈评勤主编.中国的全球变化预研究.北京:气象出版社.1992.43
[69]国家科学技术委员会编.中国科学技术蓝皮书:气候.北京:科学技术文献出版社.1990.150
[70]голbцъерг ц A. Агроклиматическийathac мира. ГидроМетоиздат. 1972
[71]魏淑秋等.中国与世界生物气候相似研究.北京:海洋出版社.1994.13～17
[72]崔读昌主编.世界农业气候与作物气候.杭州:浙江科技出版社.1993.1～9
[73]崔读昌.世界谷物产量与农业气候资源利用效率.自然资源学报.1995.85～94
[74]翁笃鸣等.小气候和农田小气候.北京.农业出版社.1981
[75]Rosenberg N J ,et al. Microclimate: the biological environment, 1983.
[76]林成谷.土壤学.北京:农业出版社.1983
[77]《中国农业百科全书》编辑部主编.中国农业百科全书:农业工程卷.北京:农业出版社.1994
[78]户苅义次.作物的光合作用与物质生产.北京:科学出版社.1989

[79]中国农业科学院蔬菜研究所主编.中国蔬菜栽培学.北京:农业出版社.1987
[80]傅抱璞.山地气候.北京:科学出版社.1983
[81]乐天宇等.小气候的改善与管理.北京:农业工程出版社.1982
[82]高素华等.橡胶林的热量平衡.气象学报.1987,45(3):229~337
[83]刘世荣等.中国森林生态系统水文生态功能规律.北京:中国林业出版社.1996
[84]中国林业科学院科技情报研究所编译.国外农田防护林.北京:中国林业出版社.1982
[85]中国农业气象研究会.中国林学会编.林业气象论文集.北京:气象出版社.1984
[86]徐德源等.新疆农业气候资源及区划.北京:气象出版社.1989
[87]中国农业气象研究会农业小气候专业委员会编.中国农业小气候研究进展.北京:气象出版社.1993
[88]王修兰等.人参、西洋参干燥特性的研究.农业工程学报.199(1):62~69
[89]王修兰等.金针菇干燥特性及数学模型.农业工程学报.1992(1):105~112
[90]赵聚宝,李克煌主编.干旱与农业.北京:中国农业出版社.1995
[91]信乃诠,赵聚宝主编.旱地农田水分状况与调控技术.北京:农业出版社.1992
[92]涂长望,黄士松.中国夏季风之进退.中国现代科学论著丛刊:气象学.北京:科学出版社.1955
[93]陶诗言,徐淑英.夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征.气象学报.32(1):1962
[94]徐瑞珍,王富.我国近五百年旱涝的初步分析.全国气候变化学术讨论会文集.北京:科学出版社.1981
[95]冯佩芝,李翠金,李小泉.中国主要气象灾害分析.北京:气象出版社.1985
[96]赵聚宝、徐祝龄等.中国北方旱地农田水分开发利用.北京:中国农业出版社.1996
[97]赵聚宝等.抗旱增产技术.北京:中国农业出版社.1998

[98]余肇福主编.作物冷害.北京:中国农业出版社.1994
[99]潘铁夫等.作物低温冷害及其防御.北京:农业出版社.1983
[100]郑大玮,唐广.蔬菜生产主要农业气象灾害的防御技术.北京:农业出版社.1987
[101]王书裕.农作物冷害的研究.北京:气象出版社.1995
[102]冯玉香,何维勋.霜冻的研究.北京:气象出版社.1996
[103]唐广,蔡涤华,郑大玮.果树蔬菜霜冻与冻害的研究.北京:农业出版社.1993
[104]郑大玮,刘中丽.小麦抗旱防冻增产技术.北京:农业出版社.1993
[105]郑大玮,龚绍先.冬小麦冻害及其防御.北京:气象出版社.1985
[106]北方小麦干热风科研协作组编.小麦干热风.北京:气象出版社.1988
[107]王邦锡等.干热风对小麦危害机理的研究.作物学报.20(2):1978
[108]任久江,王咏涛主编.农业减灾指南.北京:中国农业出版社.1996
[109]王馥棠主编.农业气象预报概论.北京:农业出版社.1991
[110]太华杰等主编.中国农业气象情报概论.北京:气象出版社.1994
[111]扬继武主编.农业气象预报和情报.北京:气象出版社.1994
[112]冯定原主编.农业气象预报和情报方法.北京:气象出版社.1988
[113]陈立亭主编.黑龙江省气象业务系统手册.北京:气象出版社.1997
[114]张福炎等.微型计算机 IBM PC 的原理及应用.南京:南京大学出版社.1991
[115]袁卫等.统计学.北京:中国统计出版社,1992
[116]陈瑶生等.计算机应用:农业数据的计算机处理.哈尔滨:黑龙江人民出版社,1997
[117]何康,刘瑞龙.中国农业百科全书:农业工程卷.北京:农业出版社.1994
[118]高亮之.水稻栽培计算机模拟优化决策系统.北京:中国农业科技出版社.1992
[119] Penning de Vries F. et al , eds. System approaches for agricultural development. Kluwer Academic Publishers, 1993
[120]张延欣等.系统工程学.北京:气象出版社.1997
[121]Teng P S, et al. System approaches for agricultural development. London and New York: Elsevier Applied Science. 1992

[122]中国农业科学院编著.农学基础科学发展战略.北京:中国农业科技出版社.1993
[123]中国21世纪议程:中国21世纪人口、环境与发展白皮书.北京:中国环境科学出版社.1994
[124]中国21世纪议程管理中心编.论中国的可持续发展.北京:海洋出版社.1994
[125]蒋建平.未来的农业科学与产业化趋势.中国科学院院刊.1995(1)
[126]王文玺.农业科技与高产优质高效农业.北京:中国农业科技出版社.1996
[127]陈万金主编.2010年中国种植业养殖业发展趋势与对策.北京:中国农业科技出版社.1997
[128]刘昌明等.中国21世纪水问题方略.北京:科学出版社.1998
[129]国家科委农村司编.中低产田治理与区域农业综合发展.北京:科学出版社.1998年
[130]帕里著M.气候变化与世界农业.周克前译.北京:气象出版社.1994

［Ｇｅｎｅｒａｌ Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝农业气象学
作者＝信乃诠主编
页数＝４４９
ＳＳ号＝１１４２４１５０
出版日期＝２００１年０１月第１版